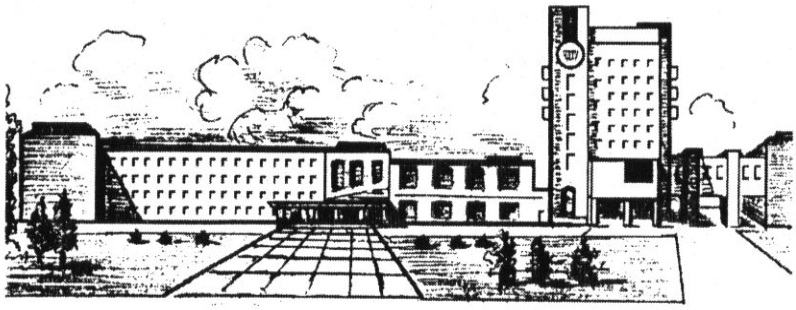
ISSN 2411-5363 (print)
ISSN 2519-4569 (online)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЧЕРНІГІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»



ТЕХНІЧНІ НАУКИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

№ 3 (21)



Чернігів 2020

УДК 62:67.05
Т38
DOI: 10.25140/2411-5363-2020-3(21)

Друкується за рішенням вченої ради Національного університету «Чернігівська політехніка» (протокол № 7 від 28.09.2020 р.). Науковий журнал «Технічні науки та технології» внесено до переліку наукових фахових видань України, затвердженого Наказом Міністерства освіти і науки України від 11.07.2019 р. № 975, відповідно до якого журналу надано категорію «Б».

Технічні науки та технології : науковий журнал / Національний університет «Чернігівська політехніка». – Т38 Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2020. – № 3(21). – 320 с.

У цьому випуску журналу «Технічні науки та технології» вміщено статті, присвячені теоретичним та експериментальним дослідженням у науковому напрямі «Технічні науки» за спеціальностями: прикладна механіка, матеріалознавство, машинобудування, інформаційно-комп'ютерні технології, енергетика, електротехніка та електромеханіка, хімічні та харчові технології, будівництво та геодезія. Статті прорецензовані провідними вченими у відповідних галузях знань.

Журнал «Технічні науки та технології» буде корисним для науковців, науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та студентів технічних спеціальностей закладів вищої освіти.

УДК 62:67.05

Головний редактор:
Казимир В. В., доктор технічних наук, професор, НУ «Чернігівська політехніка».

Заступник головного редактора:
Сапон С. П., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка».

Члени редакційної колегії:

Прикладна механіка, матеріалознавство та машинобудування

Бойко С. В., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;
Болотов Г. П., доктор технічних наук, професор, НУ «Чернігівська політехніка»;
Дубенець В. Г., доктор технічних наук, професор, НУ «Чернігівська політехніка»;
Єрошенко А. М., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;
Кальченко В. І., доктор технічних наук, професор, НУ «Чернігівська політехніка»;
Кальченко В. В., доктор технічних наук, професор, НУ «Чернігівська політехніка»;
Новомлинець О. О., доктор технічних наук, професор, НУ «Чернігівська політехніка»;
Пилипенко О. І., доктор технічних наук, професор, провідний науковий співробітник, Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки.

Інформаційно- комп`ютерні технології

Азаров О. Д,. доктор технічних наук, професор, Вінницький національний технічний університет;
Вархола Міхал, доктор технічних наук, професор, Технічний університет в Кошице (Словаччина);
Джон Н. Девис, доктор технічних наук, професор, університет Глиндор, Рексем, Великобританія;
Зайцев С. В., доктор технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка».

Енергетика, електротехніка та електромеханіка

Вінніков Д., доктор технічних наук, професор, Таллінський університет технологій (Естонія);
Волков І. В., доктор технічних наук, професор, Інститут електродинаміки НАН України;
Галкін І., доктор технічних наук, професор, Ризький технічний університет (Латвія);
Гусев О. О., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;
Денисов Ю. О., доктор технічних наук, професор, НУ «Чернігівська політехніка»;
Ромеро-Кадавал Е., доктор технічних наук, професор, Університет Естремадури (Іспанія).

Хімічні та харчові технології

Самохвалова О. В., кандидат технічних наук, професор, Харківський державний університет харчування та торгівлі;
Сиза О. І., доктор технічних наук, професор, Національний університет «Чернігівський колегіум» імені Т. Г. Шевченка;
Цибуля С. Д., доктор технічних наук, професор, НУ «Чернігівська політехніка»;
Челябієва В. М., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка».

Будівництво та геодезія

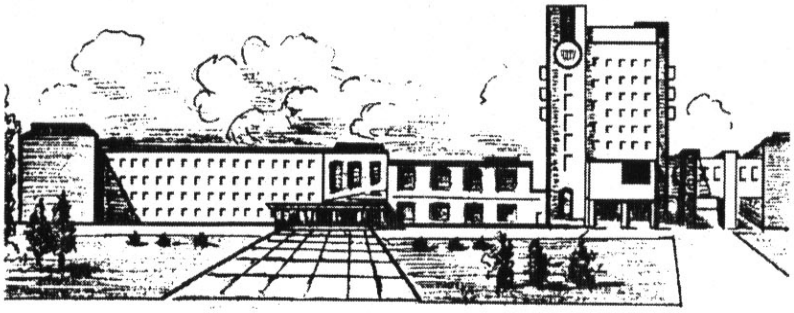
Вінніков Ю. Л., доктор технічних наук, професор, Полтавський національний технічний університет;
Шульц Р. В., доктор технічних наук, професор, Київський національний університет будівництва і архітектури.

Заснований у 1996 році. Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 24601-14541 ПР від 07.09.2020

© НУ «Чернігівська політехніка», 2020

ISSN 2411-5363 (print)
ISSN 2519-4569 (online)

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE
CHERNIHIV POLYTECHNIC NATIONAL UNIVERSITY



TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

SCIENTIFIC JOURNAL

ISSUE № 3 (21)

Chernihiv 2020

UDC 62:67.05
DOI: 10.25140/2411-5363-2020-3(21)

Published by the decision of the Academic Council of the Chernihiv Polytechnic National University (protocol № 7 dated 28.09.2020). Scientific journal "Technical sciences and technologies" is included into the list of scientific specialized editions of Ukraine, approved by the Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine dated July 11, 2019 № 975. according to which magazine is assigned a category «B».

Technical sciences and technologies: scientific journal / Chernihiv Polytechnic National University. – Chernihiv : Chernihiv Polytechnic National University, 2020. – № 3(21). – 320 p.

This issue of the journal "Technical sciences and technologies" contains articles devoted to theoretical and experimental research in the scientific direction "Technical Sciences" by specialties: applied mechanics, materials science and machine building, information and computer technologies, power engineering, electrical engineering and electromechanical engineering, chemical and food technologies, construction and geodesy. The articles are reviewed by leading scientists in relevant fields of knowledge.

Journal "Technical sciences and technologies" will be useful for the scientific and technical workers, postgraduates, master students and students of higher technical educational establishment.

UDC 62:67.05

Editor in chief:

Kazymyr V. V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Chernihiv Polytechnic National University.

Deputy Editor in chief:

Sapon S. P., PhD in Technical Sciences, Associate Professor; Chernihiv Polytechnic National University.

Members of the Editorial Board:

Applied mechanics, materials science and machine building

Boyko S. V., PhD in Technical Sciences, Associate Professor; Chernihiv Polytechnic National University;
Bolotov H. P., Doctor of Technical Sciences, Professor; Chernihiv Polytechnic National University;
Dubenets V. H., Doctor of Technical Sciences, Professor, Chernihiv Polytechnic National University;
Yeroshenko A. M., PhD in Technical Sciences, Associate Professor; Chernihiv Polytechnic National University;
Kalchenko V. I., Doctor of Technical Sciences, Professor; Chernihiv Polytechnic National University;
Kalchenko V. V., Doctor of Technical Sciences, Professor; Chernihiv Polytechnic National University;
Novomlynets O. O., Doctor of Technical Sciences, Professor; Chernihiv Polytechnic National University;
Pilipenko O. I., Doctor of Technical Sciences, Professor, leading scientific coworker, State Research Institute of Tests and Certification of Armament and Military Technique.

Information and computer technologies

Azarov O. D., Doctor of Technical Sciences, Professor, Vinnytsia National Technical University;
Varchola Michal, Professor, President of the Academic society of Michal Baludansky, Slovakia;
John N. Davies, Professor, Department of Computer Science, Glyndwr University, Wrexham, U.K;
Zaitsev S. V., Doctor of Technical Sciences, Chernihiv Polytechnic National University.

Power engineering, electrical engineering and electromechanical engineering

Vinnikov D., Doctor of Science, Senior Researcher, Head of Power Electronics R&D Group, Tallinn University of Technology, Tallinn, Estonia;
Volkov I. V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine;
Galkin I., Doctor of Science, Professor, Riga Technical University, Riga, Latvia;
Husev O. O., PhD in Technical Sciences, Associate Professor; Chernihiv Polytechnic National University;
Denysov Yu. A., Doctor of Technical Sciences, Professor; Chernihiv Polytechnic National University;
Romero-Cadaval E., Doctor of Science, Professor, University of Extremadura, Badajoz, Spain.

Chemical and food technologies

Samokhvalova O. V., PhD in Technical Sciences, Professor, Kharkiv State University of Food Technology and Trade;
Syza O. I., Doctor of Technical Sciences, Professor, Taras Shevchenko National University «Chernihiv Collegium»;
Tsybulia S. D., Doctor of Technical Sciences, Professor; Chernihiv Polytechnic National University;
CheliabiievaV. M., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Chernihiv Polytechnic National University.

Construction and geodesy

Vynnykov Y. L., Doctor of Technical Sciences, Professor, Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University;
Shults R. V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Kyiv national university of construction and architecture.

Founded in 1996. Certificate of State registration KV № 24601-14541 PR of 07.09.2020

© Chernihiv Polytechnic National University, 2020

ЗМІСТ

РОЗДІЛ І. ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА, МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО ТА МАШИНОБУДУВАННЯ

Патон Б.*, *Лебедев В., Жук Г., Пичак В. Изучение особенностей воздействия импульсной подачи электродной проволоки на результаты механизированной электродуговой сварки – наплавки 9

Лебедев В. Использование управляемых параметров подачи электродной проволоки и колебаний ванны как динамических систем для совершенствования дуговых процессов сварки и наплавки 21

Пилипенко О. Ресурсоощадні полімерні деталі приводів машин. Здобутки і перспективи 37

Кузяєв І., Митрохін О., Казіміров І. Моделювання процесів охолодження полімерних листів 60

Кальченко В., Кальченко В., Цибуля С., Сахно Є. Визначення похибки процесів шліфування та швидкісного фрезерування з урахуванням статичної та динамічної неврівноваженості 72

Полюшко В., Єрошенко А. Проведення топологічної оптимізації кронштейна та підготовлення до 3D-друку 79

Грудкіна Н., Марков О. Математичне моделювання процесів холодного видавлювання зі складною конфігурацією інструменту 89

Varga M., Filakovský F. Design, manufacturing and problem analysis of an entirely FDM 3D printed linear pneumatic actuator 98

Jánoš R. Modelling of robot manipulation in integrated production 106

Semjon J., Fufal M., Kocan M. Design of the handling process at the workplace with ABB robot and modular conveyor 112

Hroncová D. Computer simulation and analytical solution of four bar mechanism 120

Tuleja P. Analysis of existing drive unit solutions for the pneumobile project 129

Marcinko P., Hajduk M. Automobile powered by compressed AIR, pneumatic car 2020 135

РОЗДІЛ ІІ. ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Повхан І. Питання складності процедури побудови схеми алгоритмічного дерева класифікації 142

Точилін С. Прикладне програмне забезпечення для оптоволоконного цифрового спектрометра ВТС-110S 154

Зацерковний В., Савков П., Пампуха І., Синявська І. Оцінка переваг мережецентризму та мережецентричних технологій для розбудови Збройних Сил України 163

Корнієнко С., Корнієнко І., Дмитрієв В., Павленко А., Скиба О. Застосування методів кореляційного аналізу до проблеми прогнозування реального часу випробувань озброєння та військової техніки 185

Grytsiv M., Sukop M., Ferenčík P. Simulation of the trajectory of a mobile robot in Flowcode 198

Vagaš M., Šeminský Ja. Selected aspects and specifics of the robotic arm programming at automated workplaces 203

Гордєєв О., Леонтієв К. Модель сценарію оцінювання якості програмного забезпечення 209

Prada E., Kolář A. Possibilities of convert cad models for real time rendering software 220

РОЗДІЛ ІІІ. ЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

Томашевський Ю., Бурикін О., Кулик В., Малогулко Ю., Гриник В. Інформаційна система розподільної електричної мережі на базі концепції SMART METERING із застосуванням типових графіків навантаження 229

Сінчук О., Бойко С., Городній О., Долударєва Я. Метод оптимізації режимів роботи енергетичного обладнання гірничорудних підприємств 242

Šarga P., Studený M. Possibilities of stress measurement in structures using modern technologies....249

Kelemenová T., Koláriková I., Benedik O. Identification of condition of linear displacement sensor....259

Rákay R., Galajdová A. Testing properties of smart conditon monitoring system 266

Kelemen M., Sinčák Peter Ján Programmable logic controller training stands for educational purposes....274

РОЗДІЛ ІV. ХІМІЧНІ ТА ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

Челябієва В., Ольшевська С. Отримання та оцінка якості харчових жирів підвищеної біологічної цінності....281

Замай Ж., Дзюба В., Буяльська Н. Дослідження можливості доочищення стічних вод молокопереробних заводів за допомогою біопрепаратів 286

РОЗДІЛ V. БУДІВНИЦТВО ТА ГЕОДЕЗІЯ

Джуман Б., Заблоцький Ф. Застосування квадратурних формул при моделюванні гравітаційного поля STHA-функціями....293

Крячок С., Бойко О., Мамонтова Л. Врахування вимог ІКАО стосовно місцевості та перешкод у районах аеропорту для їх картографування та використання в геоінформаційних системах 301

Віват А., Кордуба Ю., Петров С. Дослідження впливу температури на зміну розміру контрольних лінійок із використанням індикатора годинникового типу....310

ОСНОВНІ ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ ТА ПОДАЧІ РУКОПИСІВ НАУКОВИХ СТАТЕЙ.... 319

CONTENT

SECTION I. APPLIED MECHANICS, MATERIALS SCIENCE AND MACHINE BUILDING

Paton B., Lebedev V., Zhuk H., Pichak V. Studying peculiarities of pulse electrode wire impact on the results of mechanized electric ARC welding – surfacing....9

Lebedev V. Use of controlled parameters of electrode wire supply and the pool vibration as dynamic systems for improving the arc welding and surfacing processes 21

Pilipenko O. Resource-saving polymer parts of machine drives. Achievements and prospects....37

Kuzyayev I., Mitrochin O., Kazimirov I. Modeling process of chilling of polymer sheets 60

Kalchenko V., Kalchenko V., Tsibulya D., Sakhno E. Determination of error of grinding and speed milling processes taking into account static and dynamic imbalance 72

Polushko V., Yeroshenko A. Topological optimization of the support and preparation for 3d printing....79

Hrudkina N., Markov O. Mathematical simulation of cold extrusion processes with complex tool configuration 89

Varga M., Filakovský F. Design, manufacturing and problem analysis of an entirely FDM 3D printed linear pneumatic actuator 98

Jánoš R. Modelling of robot manipulation in integrated production 106

Semjon J., Fufal M., Kocan M. Design of the handling process at the workplace with ABB robot and modular conveyor....112

Hroncová D. Computer simulation and analytical solution of four bar mechanism 120

Tuleja P. Analysis of existing drive unit solutions for the pneumobile project 129

Marcinko P., Hajduk M. Automobile powered by compressed air, pneumobil 2020 135

SECTION II. INFORMATION AND COMPUTER TECHNOLOGIES

Povkhan I. Questions of complexity of the procedure for constructing an algorithmic classification tree scheme....142

Tochilin S. Applied software for fiber optical digital spectrometer BTC-110s 154

Zatserkovnyi V., Savkov P., Pampukha I., Syniavska I. Assessment of the advantages of network-centrism and network-centric technologies for the development of the Armed Forces of Ukraine....163

Korniienko S., Korniienko I., Dmytriiev V., Pavlenko A., Skyba O. Application of correlation analysis methods to problem forecasting real time for test of weapons and military equipment....185

Grytsiv M., Sukop M., Ferenčík P. Simulation of the trajectory of a mobile robot in Flowcode....198

Vagaš M., Šeminský Ja. Selected aspects and specifics of the robotic arm programming at automated workplaces 203

Gordieiev O., Leontiiev K. Software quality assessment scenario model 209

Prada E., Kolář A. Possibilities of convert cad models for real time rendering software....220

SECTION III. POWER ENGINEERING, ELECTRICAL ENGINEERING AND ELECTROMECHANICAL ENGINEERING

Tomashevskyi Yu., Burykin O., Kulyk V., Malogulko Ju., Hrynyk V. Distribution electrical network information system based on the smart metering concept using standard load schedules 229

Sinchuk O., Boiko S., Gorodny O., Doludarieva Ya. Method of optimization of operating modes of energy equipment of mining enterprises....242

Šarga P., Studený M. Possibilities of stress measurement in structures using modern technologies....249

Kelemenová T., Koláriková I., Benedik O. Identification of condition of linear displacement sensor....259

Rákay R., Galajdová A. Testing properties of smart conditon monitoring system 266

Kelemen M., Sinčák Peter Ján Programmable logic controller training stands for educational purposes....274

SECTION IV. CHEMICAL AND FOOD TECHNOLOGIES

Cheliabiieva V., Olshevska S. Production and assessment of quality of food fats with of increased biological value 281

Zamai Zh., Dzjuba V., Buialska N. The study of the possibility of the post-treatment of dairy wastewater using biological products 286

SECTION V. CONSTRUCTION AND GEODESY

Dzhuman B., Zablotskyi F. Application of quadrature formulas in modelling of the gravity field by asha-functions 293

Kryachok S., Boiko O., Mamontova L. Consideration of icao requirements for terrain and obstacles in the airport area for their mapping and use in geoinformation systems 301

Vivat A., Korduba Yu., Petrov S. Investigation of the temperature influence on the change of the control meter size using the clock type indicator 310

BASIC REQUIREMENTS FOR EXECUTION AND SUBMISSION OF MANUSCRIPTS OF SCIENTIFIC ARTICLES 319

РОЗДІЛ І. ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА, МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО ТА МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 62-503.55
DOI: 10.25140/2411-5363-2020-3(21)-9-20

Борис Патон, Владимир Лебедев, Геннадий Жук, Владимир Пичак

ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНОЙ ПОДАЧИ ЭЛЕКТРОДНОЙ ПРОВОЛОКИ НА РЕЗУЛЬТАТЫ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ СВАРКИ – НАПЛАВКИ

Актуальность темы исследования. *Процессы электродуговой сварки и наплавки автоматическим или механизированным оборудованием одни из наиболее востребованных технологий постоянно совершенствуются, в том числе и за одним из основных направлений – применение импульсных воздействий. Перспективным является применение импульсной подачи электродной проволоки, а в последнее время подачи с управляемыми характеристиками и дозированной подачи. Широкое применение оборудования с импульсными алгоритмами движения электродной проволоки несколько сдерживается, в том числе из-за недостатка исследований по технико-технологическим возможностям сварки–наплавки с импульсной подачей электродной проволоки.*

Постановка проблемы. *С целью обоснованного выбора способа импульсной подачи электродной проволоки и эффективного его применения при сварке и наплавке, в том числе сложных для дугового процесса дуплексных сталей, необходима комплексная оценка влияния импульсов движения проволоки с различными параметрами на формирование металла шва, наплавленного слоя, а также их структуру и другие характеристики сварочного процесса.*

Анализ последних исследований и публикаций. *Исследования, касающиеся влияния импульсной подачи электродной проволоки на технико-технологические результаты электродуговой сварки и наплавки механизированным оборудованием, проводятся постоянно, что частично отражено в отечественной и зарубежной технической литературе, однако, как правило, они не носят комплексного характера и зачастую не подтверждены доказательными экспериментальными исследованиями с использованием современной техники эксперимента. Всё это не позволяет оценить в полной мере возможности импульсной подачи электродной проволоки и расширить применение соответствующего оборудования.*

Выделение неисследованных частей общей проблемы. *До настоящего времени остаются не до конца исследованными вопросы, связанные со структурой металла шва или наплавленного слоя, выполненных с импульсной подачей электродной проволоки в управляемом режиме. При этом следует детально изучить колебания сварочной ванны, распределение температур в ванне и околошовной зоне и др. Особое внимание следует уделить новому способу сварки-наплавки с дозированной подачей.*

Постановка задачи. *На основе комплексных экспериментальных исследований необходимо рассмотреть и проанализировать ряд основных возможностей применения механизмов управляемой импульсной подачи электродной проволоки, дозированной подачи с определением их влияния на свойства металла шва и наплавленного валика. Экспериментальные исследования провести с выявлением колебаний ванны, распределений тепла, сравнительным анализом микроструктур, замеров кристаллитов и др.*

Изложение основного материала. *Представлены и проанализированы результаты экспериментальных исследований, касающиеся результатов, получаемых при сварке-наплавке с управляемой и дозированной подачей электродной проволоки. Эти результаты относятся к формированию сварного шва, его структуре, выявлению её особенностей. При этом изучены явления колебаний ванны, формирование теплового поля, микроструктуры сечений наплавленных валиков, определены размеры кристаллитов. Полученные данные свидетельствуют о факте значительного положительного влияния на формирование сварного шва и наплавленного слоя, их структуру и возможности управления ими за счёт изменения параметров импульсов подачи электродной проволоки, что делает возможным расширение применения рассмотренных способов сварки и наплавки.*

Выводы в соответствии со статьёй. *Ряд исследований, которые направлены на выявление эффективности процессов сварки и наплавки при применении управляемой импульсной подачи электродной проволоки относятся к физико-механическим и другим свойствам сварных соединений и наплавленных слоёв и показывают существенные преимущества в сравнении с конвенциальной подачей, обеспечивая повышение качества металла, в том числе и за счёт дробления кристаллитов и снижения тепловложений. Среди ряда способов обеспечения импульсной подачи дозированная подача, с обратными связями по параметрам дугового процесса, наиболее эффективна. Эффективность применения процессов сварки и наплавки может быть использована при сварке плохо свариваемых сталей и сплавов алюминия. Это, в частности, касается сварки дуплексных сталей, некоторых сплавов алюминия, тонколистовых конструкций. Следует рекомендовать всё более широко применять механизированное и автоматическое оборудование в технологической практике при создании и ремонте самых разнообразных конструкций.*

Ключевые слова: *электродуговая сварка; плавящийся электрод; перенос электродного металла; сварочная ванна; качество шва; наплавленный слой, изучение.*

Рис.: 4. Табл.: 5. Библ.: 15.

© Патон Б. Є., Лебедев В. О., Жук Г. В., Пичак В. Г., 2020

Актуальность темы исследования. Процессы автоматической и механизированной электродуговой сварки и наплавки с применением различных видов электродных проволок имеют очень широкое распространение практически во всех отраслях промышленности, строительства и др., включая специальные задачи. Сферы использования сварочных и наплавочных автоматов и полуавтоматов включают в себя как цеховые условия, так и открытые площадки. Распространение получает оборудование для сварки под водой мокрым способом с получением достаточно качественных результатов [1].

Разработано большое число различных конструкций сварочного оборудования, в том числе на основе цифровых технологий, в которых используются новые технико-технологические решения, позволяющие в той или иной мере осуществить управление различными элементами дугового процесса. Это, в частности, относится к использованию в сварочном оборудовании инверторных источников тока, на основе которых реализуются различные импульсные алгоритмы управления переносом электродного металла – наиболее эффективного способа организации сварочного процесса с уменьшением разбрызгивания, повышением качества сварного соединения и др.

В настоящее время появилась альтернатива инверторным источникам сварочного тока – механизмы подачи с импульсными формами перемещения электродной проволоки, в том числе с управляемыми характеристиками. Такое оборудование может решать практически все проблемы сварки, в частности при сварке – наплавке в защитных газах, включая значительное повышение эксплуатационных свойств сварного соединения и наплавленного слоя при снижении материальных и энергетических ресурсов [2; 3]. Применение в сварочном оборудовании механизмов с импульсной подачей электродной проволоки не исключает включение в его состав инверторных источников. Такой тандем позволяет ещё более эффективно применять и автоматы, и полуавтоматы для сварки и наплавки, как это отчасти показано в работе [4].

Постановка проблемы. Процессы сварки и наплавки с применением инверторных источников сварочного тока и их возможности достаточно хорошо изучены. Технологические возможности применения механизмов импульсной подачи современных конструкций с применением малоинерционных электродвигателей (вентильных, шаговых) с компьютеризованными системами управления и регулирования, например, такими, которые описаны в работе [5] и которые использовались в настоящей работе, изучены недостаточно. Следовательно, не до конца определены сферы применения механизированного оборудования с такими системами.

Анализ последних исследований и публикаций. В настоящей работе не рассматриваются вопросы, связанные со снижением разбрызгивания электродного металла. Управление геометрическими характеристиками сварного шва и наплавленных валиков, так как они достаточно подробно отображены в целом ряде работ, например [6].

Известно [7], что вибрационные воздействия на жидкий металл, которым является сварочная ванна, оказывают существенное влияние на кристаллизацию этого металла. Вибрация жидкого металла позволяет существенно уменьшить рост зерна кристаллитов, способствовать его дезориентации, повысить вероятность дегазации ванны и способствовать выходу неметаллических соединений и повышению прочности сварного шва и наплавленного валика. Этим и рядом других явлений объясняется необходимость изучения сварочной ванны при использовании импульсной подачи электродной проволоки.

Выделение неисследованных частей общей проблемы. Следует указать, что параметры импульсной подачи для предварительного анализа и формулирования данных для последующего комплекса исследований выбирались из ранее наработанного банка данных, частично изложенных в работах [8; 9], и позволяющих получить близкие к оптимальным по большинству характеристик результаты.

Получение реального математического описания явлений в сварочной ванне представляет очень сложную задачу, хотя имеются работы в этом направлении с моделированием движения для ряда конкретных случаев [10]. Можно считать, что основным направлениям комплекса исследований должны быть экспериментальные исследования с применением современного оборудования.

Постановка задачи. Целью настоящей работы является рассмотрение некоторых возможностей применения механизмов управляемой импульсной подачи электродной проволоки с определением её влияния на свойства металла шва и наплавленного валика с применением экспериментальных исследований и их анализом при ведении дугового процесса в среде защитных газов, а также определение направлений рационального применения современных разработок механизмов импульсной подачи, включая дозированную подачу.

Изложение основного материала. Движение ванны расплавленного металла изучали по результатам скоростной видеосъёмки во время переноса электродного металла. Использовалась камера скоростной видеосъемки *Mikrotron MC – 1310* с частотой съемки кадров до 1 кГц, лампа подсветки столба дуги *LSB 640 Hg.*

На фотографии рис. 1 представлены кадры сравнительного переноса электродного металла при наплавке обычным процессом и процессом с импульсной подачей электродной проволоки Св08Г2 с диаметром 1, 2 мм при сварке в защитных газах. На фотографиях можно видеть, что колебания жидкого металла при импульсе подачи более значимы, чем при обычной подаче. Это особенно заметно в момент короткого замыкания (кадры 2, 3). Здесь важно заметить, что при импульсной подаче переносимая капля электродного металла не деформируется и стабильна в осевом направлении в отличие от капли в обычном процессе. Это свидетельствует о том, что сила, действующая на каплю при ускорении в импульсе превышает противодействующие силы в виде реактивного движения газов и частично сил поверхностного натяжения, что характерно для обычной подачи электродной проволоки.

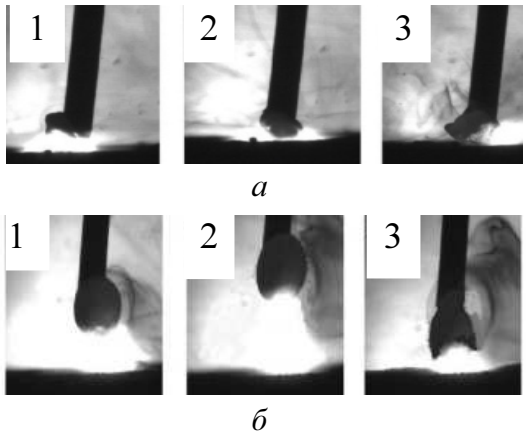


Рис. 1. Перенос электродного металла: а – обычная подача; б – импульсная подача

По характерным результатам видеосъемки всего участка ванны определялась зависимость

$$h = f(l), \tag{1}$$

где h – высота ванны; l – расстояние по длине ванны.

Точки измерения h, l отсчитывались от оси подачи электродной проволоки на уровне наплавляемого металла.

Зависимость (1) для ряда временных промежутков от 0 до 3 мс представлена на графиках рис. 2.

Можно заметить, что движение поверхности сварочной ванны при импульсной подаче носят колебательный характер с частотой идентичной частоте подачи.

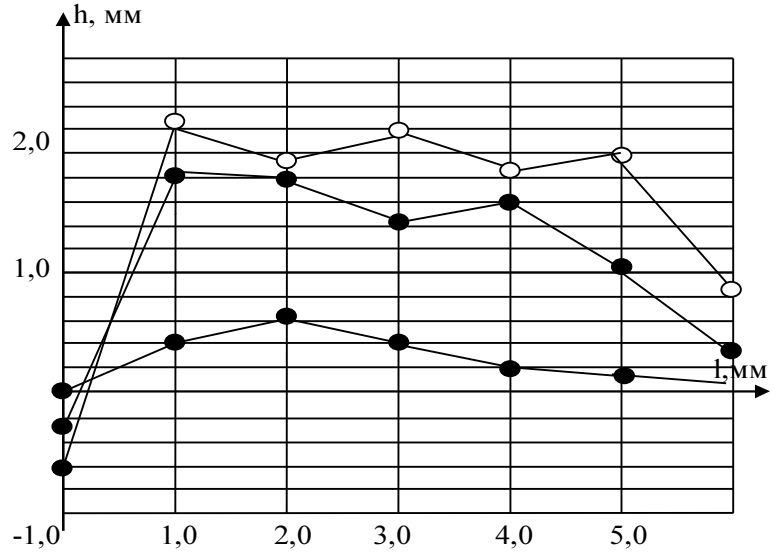


Рис. 2. Перемещение поверхности сварочной ванны относительно начала измерений

Если выполнить комплекс измерений колебаний сварочной ванны для массива импульсов подачи электродной проволоки с анализом полученных микрошлифов, то можно найти зависимости влияния параметров импульсной подачи на структуру металла шва, в частности на измеряемую характеристику – величину кристаллитов.

На фотографии рис. 3 для качественной оценки представлены микроструктуры наплавленного металла в поперечном сечении в сравнении с основным металлом, наплавленным металлом при сварке с обычной подачей и импульсной подачей электродной проволоки с дозированным регулированием за счёт введения регулируемой обратной связи по току дугового процесса. Анализ массива микрошлифов, полученных в результате наплавки, в том числе с импульсными алгоритмами воздействия электродной проволоки на ванну расплавленного металла показывает, что в случае действия импульса движения происходит дробление кристаллитов и их дезориентация, что способствует повышению механических свойств сварного шва или наплавленного слоя.

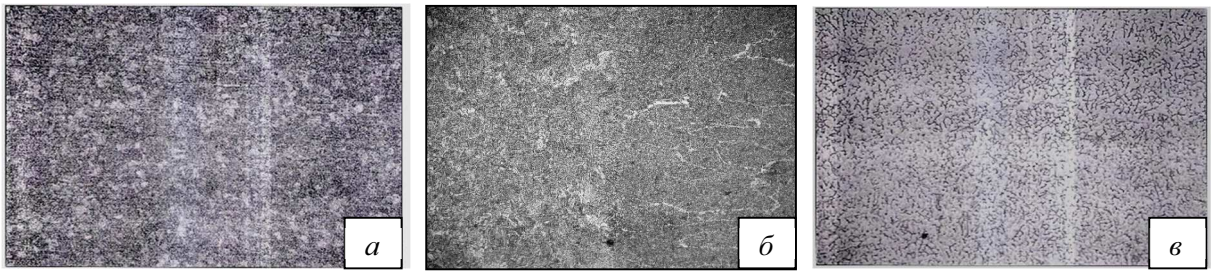


Рис. 3. Микрошлифы поперечных сечений металла наплавленного в среде CO_2 электродной проволокой диаметром 1,2 мм с 200 кратным увеличением при сварке: а – с плавной подачей проволоки; б – с импульсной подачей; в – с дозированной подачей

Изучение этого эффекта проводилось на образцах путём измерения твёрдости наплавленных слоев и опосредованного определения размеров кристаллитов при различных способах подачи для сравнительного анализа при применении электродных проволок одного и того же состава.

Размер кристаллитов в структуре наплавленного металла определялся на оптическом микроскопе NEOPHOT 32 с использованием методик, регламентированных ГОСТ 5639 – 82. Следует отметить, что кристаллитом считается отдельный кристалл поликристаллического конгломерата, который ограничен смежными поверхностями - границами зерна.

Сравнительный анализ микроструктуры формы и размеров кристаллитов в центральной части наплавленного металла показал, что при импульсной подаче они имеют существенно меньшую ширину и коэффициент формы. В табл. 1 представлено сравнение показателей формы кристаллитов в наплавленном металле при наплавке легированных сталей в средней части наплавленного валика. При сварке в значительной мере снижается также длина кристаллитов, значительная часть из которых не превышает 210 мкм по сравнению с 640…700 мкм при постоянной подаче электродной проволоки. При сварке – наплавке с дозированной подачей электродной проволоки, используя специальные целенаправленные настройки системы управления, можно ещё более снизить геометрические размеры кристаллитов.

Таблица 1

Количественные показатели формы кристаллитов в наплавленном металле

Подача электродной проволоки	**Ширина кристаллитов, мкм**	**Коэффициент формы кристаллитов**
Плавная	97,5	6,8
Импульсная	70,0	4,56
Дозированная с целенаправленной настройкой	52	3,12

Показано, что используя импульсную подачу электродной проволоки можно более, чем двукратно уменьшить размеры кристаллитов в структуре наплавленного слоя, а, следовательно, обеспечить улучшенные эксплуатационные свойства изделия.

Для наплавленного слоя, выполненного с целью придания изделию определённых свойств, связанных с прочностью и износостойкостью был выполнен цикл работ по определению твердости и сопротивления трению (трибологические испытания). Испытания проводились в сравнении результатов для сварки-наплавки с обычной и импульсной подачей электродной проволоки одного и того же типа.

Показатели твёрдости были получены с помощью твёрдомера LECO M – 400 по методикам ДСТУ ISO 6507-1:2007 при нагрузке идентора на образец 1 кГ. Некоторые усреднённые результаты измерений наплавленного слоя в его центре и в зоне термического влияния даны в табл. 2.

Таблица 2

Результаты исследований твёрдости

Способ подачи проволоки	**Твердость наплавленного металла $B \times 10^7$ Па**	**Твердость металла зоны термического влияния ЗТВ $B_{ЗТВ} \times 10^7$ Па**
Плавный	165	161
Импульсный	198	212
Дозированный	202	218…225

Можно отметить, что используя импульсную подачу электродной проволоки, твердость наплавленных валиков существенно возрастает, повышая эксплуатационные возможности наплавленного изделия. Этот эффект можно объяснить, в основном реструктуризацией наплавленного слоя, а также частично уровнем перехода легирующих элементов, определяющих физические свойства наплавленного слоя.

Сравнительная оценка трибологических свойств наплавленного слоя производилась при трении металла по металлу на специализированной установке для комплексной оценки свойств наплавленного металла (разработка ИЭС им. Е. О. Патона), при следующих условиях: удельное давление в месте контакта 100 МПа; скорость трения 11...12 м/мин. При этом виде исследования использовались образцы, наплавленные электродной проволокой Нп-30ХГСА при двух способах её подачи с режимами, обеспечивающими одинаковые количества поданной проволоки или одинаковые параметры наплавленного валика.

Некоторые результаты трибологических сравнительных исследований с усреднением результатов представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты исследований темпа износа

Способ подачи	**Частота подачи *f*, Гц**	**Скважность *S***	**К-во наплавленных слоёв *n***	**Средний темп износа, мм³/км**
Плавная	0	0	1	7,3
Импульсная	15	3	1	3,8
Импульсная	60	3	1	6,6
Импульсная	20	5	1	4,2
Импульсная	60	5	1	5,8
Плавная	0	0	5	3,9
Импульсная	15	3	5	3,2
Импульсная	20	5	5	2,7

Необходимо отметить факт изменения уровня перехода легирующих элементов при использовании процессов сварки – наплавки с импульсной подачей электродной проволоки, который в существенной степени влияет на качество металла шва или наплавленного слоя с получением определённых эксплуатационных свойств.

Химический состав наплавленного слоя определялся с использованием атомно-эмиссионного метода спектроскопии. Выборочное определение состава наплавленного слоя, полученное для сравнения при плавной и импульсной подаче электродной проволоки Нп-30ХГСА с разными параметрами представлены в табл. 4.

Таблица 4

Массовая доля легирующих элементов в наплавленном слое

(*f*/*S*)	*C*, %	*Cr*, %	*Mn*, %	*Si*, %	
(20/5)	0,17	0,55	1,06	0,80	1 слой
постоянная подача	0,17	0,63	1,10	0,87	
(20/5)	0,21	0,98	0,84	0,78	5 слоёв
постоянная подача	0,20	0,90	0,81	0,70	

Очевидно, что массовая доля легирующих элементов, в частности для 5-слойной наплавки, заметно выше для способа сварки с импульсной подачей электродной проволоки.

Большое число источников, например [11], показывают, что при прочих равных условиях и полученных результатах тепловложения от дугового процесса с применением импульсных алгоритмов подачи электродной проволоки в сравнении с плавной подачей снижаются. В работе даются некоторые результаты измерения температуры в границах 400-700° С в области, сопрягающейся со сварочной ванной.

При дистанционном измерении температуры весьма желательно иметь возможности фиксации прибора на участке, близком к точечному.

Измерения проводились с использованием современной инфракрасной камеры OPTRIS Xi 80 с верхним диапазоном измеряемых температур 150...900° С. Поле измерения камеры в диапазоне 12° (f = 12,7 мм)…80° (f = 2,3 мм).

Замеры производились (по возможности) в одних и тех же маркированных точках на ряде наплавляемых образцов, а результаты замеров представлены на рис. 4, где значком ⬬ обозначены зоны измерений в диапазоне температур 400–650°С.

Рассмотрение результатов измерений температуры зоны выполняемой наплавки валика показанных на рис. 4 позволяет доказательно утверждать, что при одинаковой геометрии валика или одинаковом расходе электродной проволоки (использован специальный датчик движения на основе энкодеров) тепловложения при сварке с постоянной подачей электродной проволоки больше.

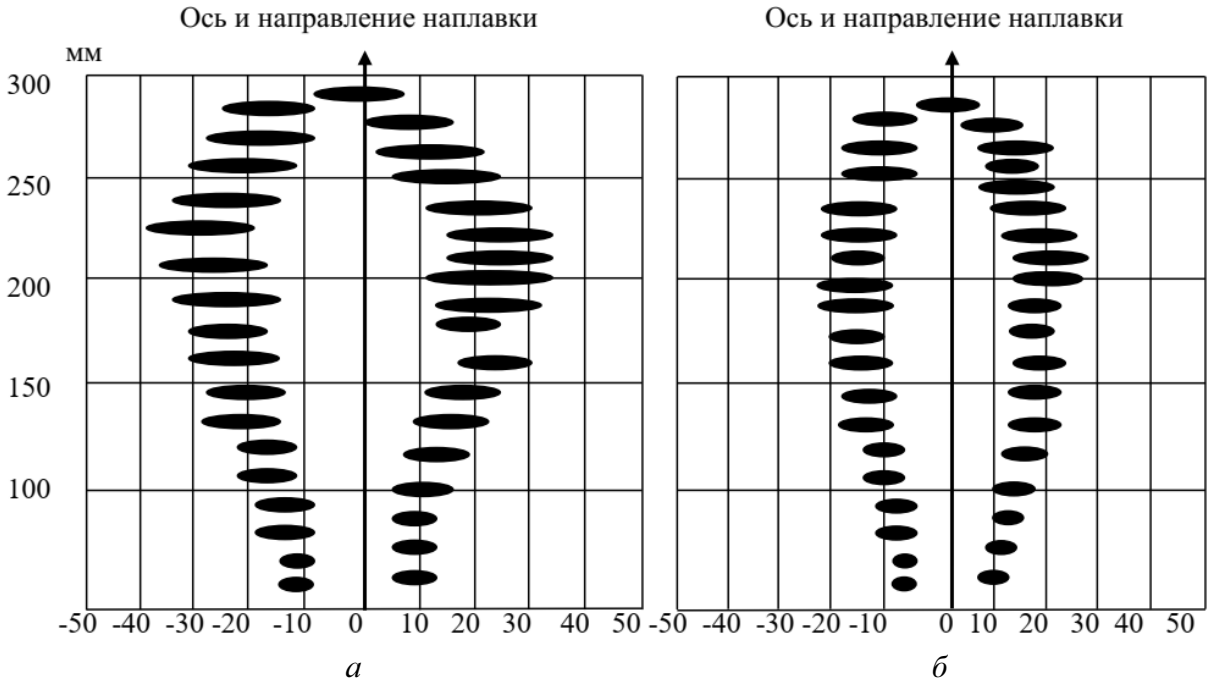


Рис. 4. Распределение температур при сварке: а) с импульсной подачей электродной проволоки, б) с постоянной подачей электродной проволоки (показан температурный интервал 600...400°С)

Как видно из графиков распределение температур при сварке с постоянной подачей электродной проволоки имеют более развитую форму, что объясняется большим тепловложением.

Следует отметить, что снижение тепловложений при сварке-наплавке с импульсной подачей электродной проволоки хорошо коррелируется с результатами параллельных замеров расхода электроэнергии, производимых с применением специально разработанного прибора ИЭ-1 -200, работа которого описана в работе [12], и который используется нами, в основном, при сравнительных исследованиях.

Серьёзная проблема при сварке и наплавке это деформация изделия, возникающая как действие последующих остаточных напряжений. Остаточные напряжения и деформации в сварных изделиях необходимо уменьшать и целесообразнее всего это нужно делать ещё в процессе сварки и наплавки.

Существует большое число способов уменьшения деформаций, как следствия остаточных напряжений. Одно и того, на что можно влиять, используя результаты настоящей работы – снижение тепловложения в металл. Таким образом уменьшаются эпюры остаточных продольных пластических деформаций укорочения, являющиеся, в основном, ответственными за остаточные напряжения и деформации.

Качественную оценку действия тепловложений проводили в сравнительных измерениях для обычного процесса и процесса с импульсной подачей электродной проволоки. Для определения напряжений были использованы два вида датчиков: магнитострикционный и тензорезисторный датчики с многоканальными системами измерений и регистрации. Измерялись напряжения до и после сварки для каждого из способов подачи.

Как и в случае определения температуры, режимы дугового процесса были выбраны таковыми, чтобы для обычной и импульсной подачи соблюдались условия равенства геометрии наплавленного валика и количества проволоки, затраченной на получение указанной геометрии.

Используя результаты проведенных исследований по замеру деформаций можно заключить, что при механизированной дуговой сварке в защитных газах с использованием импульсной подачи электродной проволоки в зависимости от параметров импульсов и установленных режимов за счёт снижения тепловложений можно снизить показатели остаточных деформаций изделия в 1,5…2,0 раза. Этот эффект с большими возможностями может быть использован, в частности, при сварке длинномерных конструкций, которые, например, часто применяются в конструкциях судов.

Представляет интерес возможность эффективного использования импульсных алгоритмов управления подачей электродной проволоки при сварке дуплексных (аустенитно-ферритная структура) сталей [13; 14]. В последнее время такие стали находят всё более широкое применения благодаря их свойствам. Вследствие своей двухфазной структуры, все современные типы дуплексных сталей имеют высокую стойкость к трещинообразованию при коррозии. Дуплексные нержавеющие стали имеют низкое содержание углерода и это делает их устойчивыми к межкристаллитной коррозии. Эти и другие свойства, например, прочностные характеристики дуплексных сталей требуют особого подхода к их сварке. Это касается сохранения у этих сталей мелкозернистой структуры и необходимости сохранения в зоне сварки фазового состава аустенита и феррита близкого к составу свариваемого металла. Кроме этого существуют рекомендации касающиеся ограничения тепловложений в сварочную ванну, при этом тепловложения Q где U, отнесённые к скорости выполнения сварного шва v должны составлять:

$$Q = k\frac{UI}{v} \le 2,5 \text{ кДж/мм}, \qquad (2)$$

где U, I – напряжение и ток сварочного процесса; k – коэффициент, учитывающий отличия величин от системы СИ.

Коэффициент k, с ограничениями по теплоложениям $Q \le 2,5$ *кДж/мм*, отмеченным в рекомендательной литературе по сварке дуплексных сталей, имеет размерность $k = 0,06$.

С учётом указанного выражение (2) примет вид:

$$Q = \frac{0,06\,UI}{v} \le 2,5\,\text{кДж/мм}. \qquad (3)$$

В этом случае скорость ведения сварочного процесса v измеряется в мм/мин.

Исходя из выражения (3) можно выбрать режим сварки, при котором равновесная структура дуплексных сталей сохраняется. Однако выбранные параметры U, I и v с соблюдением условия (3) более характерны для аргонодуговой сварки, производительность которой может быть недостаточной.

Применение механизированной сварки дуплексных сталей может быть эффективным в случае применения оборудования с управляемыми импульсными характеристиками импульсов подачи электродной проволоки, в частности с использованием дозированной подачи, т.к. обеспечивают существенно меньшие затраты электроэнергии и, соответственно тепловложения Q.

Исследование действия импульсной подачи на характеристики металла дуплексной стали в сравнении с результатами, полученными при сварке с плавной подачей электродной проволоки стали 12Х21Н5Т.

Пробные сравнительные процедуры сварки выполнялись в нижнем положении на режимах, формирующих одинаковые сечения швов и расход электродной проволоки и приведены в табл. 5.

Таблица 5

Состав металла шва дуплексной стали, при различных способах подачи электродной проволоки

Зона сварного соединения	**Способ подачи электродной проволоки**			
	Плавная		Дозированная	
	Содержание фазовых составляющих, %			
	Феррит	Аустенит	Феррит	Аустенит
Основной металл	*68,9*	*31,1*	***56,3***	***43,7***
Середина шва	*61,2*	*38,8*	***53,9***	***46,1***
Корень шва	*60,8*	*39,2*	***52,6***	***47,4***

Можно заметить, что исходя из результатов, приведенных в табл. 5, сварка с плавной подачей проволоки при сварке дуплексных сталей (в зависимости от режима) может привести к повышению ферритной составляющей, а, следовательно, к ухудшению свойств исходного материала в зоне сварки. В тех же случаях сварка с импульсной подачей электродной проволоки позволяет снизить выделение ферритной составляющей и получить близкое к равновесному ферритно-аустенитному состоянию шва.

Механические испытания образцов показали удовлетворительные характеристики значений предела прочности и ударной вязкости при комнатной температуре для сварки с импульсной подачей электродной проволоки. Свойства полученных сварных соединений не уступают свойствам основного металла

Важно заметить, что другие типы легированных сталей, в том числе тонколистовые конструкции из них, могут быть эффективно сварены с применением импульсной подачи электродной проволоки.

Дополнительно можно отметить, что в некоторых случаях применение импульсной подачи электродной проволоки позволяет избежать необходимости послесварочной термической обработки при сварке нержавеющих сталей.

Необходимо особо указать на существенное снижение выбросов вредных аэрозолей при дуговой сварке – наплавке с импульсными алгоритмами движения электродной проволоки, которое подробно рассмотрено в работе [15], что расширяет сферы и условия использования этого вида технологического процесса.

Выводы в соответствии со статьёй.

1. Комплекс исследований, проведенных для оценки эффективности применения управляемой импульсной подачи электродной проволоки при дуговой механизированной сварке и наплавке и касающихся физико-механических свойств результатов дугового процесса показывает, что по всем изученным направлениям импульсная подача имеет преимущества в сравнение с традиционной плавной подачей, обеспечивая повышение качества металла шва и наплавленного слоя, в том числе и путём дробления кристаллитов и их дезориентации, а также снижением тепловложений в зону шва и околошовную зону.

2. Параметры импульсной подачи по разному влияют на результаты процессов сварки и наплавки, при этом наиболее универсальной является дозированная подача электродной проволоки, в реализации которой используются обратные связи по дуговому процессу, в том числе и по току, который является ситуативным параметром.

3. Дальнейшие исследования эффективности применения различных алгоритмов формирования импульсной подачи, в частности дозированной подачи, как варианта синергетического управления переносом электродного металла, должно основываться на выборе оптимальных импульсных воздействий, для эффективного решения сразу нескольких задач регулирования сварочного процесса, который в своей сложности в этом случае становиться всё более управляемым.

4. Эффективность применения импульсной подачи электродной проволоки при ведении процессов сварки и наплавки с созданием соответствующего оборудования с участием украинских производителей предполагает все более широкое его применение, а также организацию производства полуавтоматов различного назначения на основе рассмотренных технологий.

Список использованных источников

1. Патон Б. Е. Избранные труды. Киев, 2008. 894 с.

2. Лебедев В. А., Лендел И. В. Исследование технологических возможностей дуговой сварки и наплавки с импульсной подачей электродной проволоки. *Наукоёмкие технологи в машиностроении.* 2015. № 9. С. 20–27.

3. Kuo C.-W., Yang S.-M., Chen J.-H., Lai G.-H., Chen Y.-C., Chang Y.-T., & Wu W. Preferred Orientation of Inconel 690 after Vibration Arc Oscillation Welding. *Materials Transactions*. 2008. Vol. 49(3). Pp. 688–690. DOI: 10.2320/matertrans. mep2007305.

4.Патон Б. Е., Лебедев В. А., Пичак В. Г., Полосков С. Ю. Эволюция систем импульсной подачи проволоки для сварки и наплавки. *Сварка и диагностика.* 2009. № 3. С. 46–51.

5. Лебедев В. А., Гулый М. В. Быстродействующий вентильный электропривод для оборудования механизированной дуговой сварки. *Мехатроника. Автоматизация, Управление*. 2014. № 6. С. 47–51.

6. Lebedev V., Reisgen U. & Lendel I. Study of technological opportunities of GMAwelding andsurfacing with pulse electrode wirefeed. *Welding in the World.* February 2016. P. 9.

7. Jose M. J., Kumar S. S., Sharma A. Vibration assisted welding processes and their influence on quality of welds. *Science and Technology of Welding & Joining*. 2016. Vol. 21(4). DOI: 10.1179/1362171815y.0000000088.

8. Воропай Н. М. Параметры режимов и технологические возможности дуговой сварки с импульсной подачей электродной и присадочной проволоки. *Автоматическая сварка*. 1996. № 10. С. 3–9.

9. Анализ технических и технологических возможностей импульсной подачи электродной проволоки в процессах дуговой сварки и наплавки / Б. Е. Патони др. *Сварочное производство*. 2002. № 2. С. 24–31.

10. Судник В. А., Ерофеев В. А., Масленников А. В., Цвелёв Р. В. Математическая модель формирования сварочной ванны при дуговой сварке под флюсом и анализ процесса переноса металла. *Известия ТулГУ. Технические науки*. 2015. Вып. 6. Ч. 2. С. 21–31.

11. Морозов В. П. Анализ условий формирования измельченной структуры при кристаллизации металла сварочной ванны с наложением внешних периодических возмущений. *Известие ВУЗов: Машиностроение*, 2006. № 8. С. 41–54.

12. Лебедев В. А., Гулый М. В., Плехотко Г. А. Устройство для оценки энергоэффективности процессов. *Сварка и диагностика*. 2011. № 3. С. 50–53.

13. Сварка дуплексных нержавеющих сталей. URL: http://www.avestawelding.com/4976.epibrw.

14. Mondal A., Kumar Saha M., Hazra R., Das S. Influence of heat input on weld bead geometry using duplex stainless steel wire electrode on low alloy steel specimens. *Cogent Engineering*. 2016. Vol. 3(1). Pp. 14. DOI: 10.1080/23311916.2016.1143598.

15. Лебедев В. А., Левченко О. Г., Максимов С. Ю., Лукьяненко С. Ю., Лендел И. В. Гигиенические характеристики меанизированной дуговой сварки с импульсной подачей электродной проволоки. *Безопасность Жизнедеятельности*. 2015. № 9. С. 15–18.

References

1. Paton B. E. (2008). *Izbrannye trudy [Selected Works]*.

2. Lebedev V. A., Lendel I. V. (2015). Issledovanie tekhnologicheskikh vozmozhnostei dugovoi svarki i naplavki s impulsnoi podachei elektrodnoi provoloki [Research of technological capabilities of arc welding and surfacing with pulse feed of electrode wire]. *Naukoyomkie tekhnologii v mashinostroenii – High-tech technologists in mechanical engineering*, 9, pp. 20–27.

3. Kuo, C.-W., Yang, S.-M., Chen, J.-H., Lai, G.-H., Chen, Y.-C., Chang, Y.-T., & Wu, W. (2008). Preferred Orientation of Inconel 690 after Vibration Arc Oscillation Welding. *Materials Transac-tions*, 49(3), pp. 688–690/ DOI: 10.2320/matertrans. mep2007305.

4. Paton, B. E., Lebedev, V. A., Pichak, V. G., Poloskov, S. Yu. (2009). Evoliutsiia sistem impulsnoi podachi provoloki dlia svarki i naplavki [Evolution of pulse wire feed systems for welding and surfacing]. *Svarka i diagnostika – Welding and diagnostics,* 3, pp. 46–51.

5. Lebedev, V. A., Gulyi, M V. (2014). Bystrodeistvuyushhii ventilnyi elektroprivod dlia oborudovaniia mekhanizirovannoi dugovoi svarki [Fast-acting valve electric drive for mechanized arc welding equipment]. *Mekhatronika. Avtomatyzatsiia, Upravlenie – Mechatronics. Automation, Management*, 6, pp. 47–51.

6. Lebedev, V., Reisgen, U., & Lendel, I. (2016). Study of technological opportunities of GMAwelding andsur-facing with pulse electrode wirefeed. *Welding in the World*. February, P. 9.

7. Jose, M. J., Kumar, S. S., & Sharma, A. (2016). Vibration assisted welding processes and their in-fluence on quality of welds. *Science and Technology of Welding & Joining*, 21(4). DOI: 10.1179/1362171815y.0000000088.

8. Voropai, N. M. (1996). Parametry` rezhimov i tekhnologicheskie vozmozhnosti dugovoj svarki s impul`snoj podachej e`lektrodnoj i prisadochnoj provoloki [Parameters of modes and technological capabilities of arc welding with pulse feed electrode and filler wire]. *Avtomaticheskaia svarka – Automatic welding,* 10, pp. 3–9.

9. Paton, B. E., Lebedev, V. A., Pichak, V. G., Poloskov, S. I., Shhavelev, L. N. (2002). Analiz tekhnicheskikh i tekhnologicheskikh vozmozhnostei impulsnoi podachi elektrodnoi provoloki v proczessakh dugovoi svarki i naplavki [Analysis of technical and technological capabilities of pulse feed of electrode wire in arc welding and surfacing]. *Svarochnoe proizvodstvo – Welding production,* 2, pp. 24–31.

10. Sudnik, V. A., Erofeev, V. A., Maslennikov, A. V., Tsvelev, R. V. (2015). Matematicheskaia model formirovaniia svarochnoi vanny pri dugovoi svarke pod fliusom i analiz proczessa perenosa metalla [Mathematical model of weld pool formation in submerged arc welding and analysis of metal transfer process]. *Izvestiia TulGU. Tekhnicheskie nauki – Bulletin of TulSU. Technical science, 6*(2), pp. 21–31.

11. Morozov, V. P. (2006). Analiz uslovii formirovaniia izmelchennoi struktury pri kristallizatsii metalla svarochnoi vanny s nalozheniem vneshnikh periodicheskikh vozmushhenii [Analysis of the conditions for the formation of a ground structure during crystallization of the weld pool metal with the imposition of external periodic disturbances]. *Izvestie VUZov: Mashinostroenie – Bulletin of Universities: Mechanical Engineering,* 8, pp. 41–54.

12. Lebedev, V. A., Guly, M. V., Plekhotko, G. A. (2011). Ustroistvo dlia otsenki energoeffektivnosti proczessov [A device for assessing the energy efficiency of processes]. *Svarka i diagnostika – Welding and diagnostics*, 3, pp. 50–53.

13. Svarka dupleksnykh nerzhaveyushhikh stalei [Welding of duplex stainless steels]. (n.d.). http://www.avestawelding.com/4976.epibrw.

14. Mondal, A., Kumar Saha, M., Hazra, R., & Das, S. (2016). Influence of heat input on weld bead geometry using duplex stainless steel wire electrode on low alloy steel specimens. *Cogent Engineering*, 3(1), pp. 14. DOI: 10.1080/23311916.2016.1143598.

15. Lebedev, V. A., Levchenko, O. G., Maksimov, S. Yu., Lukianenko, S. Yu., Lendel, I. V. (2015). Gigienicheskie kharakteristiki meanizirovannoj dugovoj svarki s impulsnoi podachei elektrodnoi provoloki [Hygienic characteristics of meanized arc welding with pulsed electrode wire feed]. *Bezopasnost Zhiznedeyatelnosti – Life Safety,* 9, pp. 15–18.

UDC 4562-503.55

Boris Paton, Vladimir Lebedev, Hennady Zhuk, Vladimir Pichak

STUDYING PECULIARITIES OF PULSE ELECTRODE WIRE IMPACT ON THE RESULTS OF MECHANIZED ELECTRIC ARC WELDING – SURFACING

Relevance of the research topic*. The processes of electric arc welding and surfacing with automatic or mechanized equipment are some of the most popular technologies, which constantly being improved, in one of the main directions – the use of impulse effects. The use of pulse feed of electrode wire, and more recently feed with controlled characteristics and metered feed, is being promising. The widespread use of equipment with pulsed electrode motion algorithms is somewhat constrained, in particular, due to the lack of research on the technical and technological possibilities of welding - surfacing with a pulsed electrode wire feed.*

Formulation of the problem*. In order to make a reasonable choice of the method of pulsed electrode wire feed and its effective use in welding and surfacing, including difficult for the arc process duplex steels, it is necessary to make a comprehensive assessment of the influence of wire impulses with different parameters on the formation of the weld metal, deposited layer, as well as their structure and other characteristics of the welding process.*

Analysis of recent research and publications*. Studies concerning the influence of pulsed electrode wire feed on the technical and technological results of electric arc welding and surfacing with mechanized equipment are carried out continuously, which is partially reflected in domestic and foreign technical literature, however, as a rule, they are not of a complex nature and are often not confirmed evidence-based experimental research using modern experimental techniques. All this does not allow us to fully assess the possibilities of pulsed electrode wire feed and expand the use of the corresponding equipment.*

Isolation of unexplored parts of a common problem. *Until now, the issues related to the structure of the weld metal of the deposited layer made with a pulsed feed of the electrode wire in a controlled mode remain not fully investigated. In this case, it is necessary to study in detail the fluctuations of the weld pool, the temperature distribution in the pool and the near-well zone. Particular attention should be paid to the new controlling feed welding method.*

Formulation of the problem. *On the basis of complex experimental studies, to consider and analyze a number of basic possibilities of using the mechanisms of controlled pulse feed of electrode wire, controlling feed with determination of their influence on the properties of the weld metal and the deposited bead. Experimental studies should be carried out with the identification of pool oscillations, heat distributions, comparative analysis of microstructures, measurements of crystallites, etc.*

Presentation of the main material. *Presented and analyzed results of experimental studies concerning the results obtained in welding-surfacing with controlled and dosed feed of the electrode wire. These results relate to the formation of a weld, its structure, and the identification of its features. At the same time, the phenomena of oscillations of the pool, the formation of the thermal field, the microstructure of the sections of the deposited beads were studied, the sizes of crystallites were determined. The obtained data indicate the fact of a significant positive effect on the formation of the weld and the deposited layer, their structure and the possibility of controlling them by changing the parameters of the pulses of the electrode wire, which makes it possible to expand the considered welding and surfacing methods.*

Conclusions in accordance with the article. *A number of studies that are aimed at identifying the efficiency of welding and surfacing processes when using a controlled pulse feed of an electrode wire refer to the physical-mechanical and other properties of welded joints and deposited layers and show significant advantages in comparison with conventional feed, providing an increase in the quality of the metal, including and by crushing crystallites and reducing heat input. Among a number of methods for providing impulse feed, dosed feed with feedback on the parameters of the arc process is the most effective. The efficiency of the application of welding and surfacing processes can be used when welding poorly weldable steels and aluminum alloys. This, in particular, applies to the welding of duplex steels, some aluminum alloys, and thin construction. It should be recommended to use more and more widely mechanized and automatic equipment in technological practice in the creation and repair of a wide variety of structures.*

Keywords: *electric arc welding; consumable electrode; transfer of electrode metal; weld pool; weld quality; deposited layer, study.*
Fig.: 4. Table: 5. References: 15.

Патон Борис Евгеньевич – доктор технических наук, профессор, Президент НАН Украины. Институт электросварки им. Е. О. Патона Национальной академии наук Украины. (ул. Казимира Малевича, 11, г. Киев, 03150, Украина).

Paton Borys – Doctor of Technical Sciences, Professor, President of National Academy of Sciences of Ukraine. E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine (11 Kazymyr Malevych St., Kiev 03150, Ukraine)

Лебедев Владимир Александрович – доктор технических наук, главный конструктор ГП ОКТБ ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. Государственное предприятие "Опытное конструкторско-технологическое бюро Института электросварки им. Е. О. Патона Национальной академии наук Украины" (ГП «ОКТБ ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ») (ул. Боженко, 15, корп. 7, г. Киев, 03150, Украина).

Lebedev Vladimir – Doctor of Technical Sciences. chief designer SF "Experimental Design-Technological Office of the E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine" (SF "EDTO E. O. Paton EWI NASU") (15 Bozhenko Str., bld. 7, 03150 Kiev, Ukraine).

E-mail: valpaton@ukr.net

ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0391-6113

Жук Геннадий Владимирович – директор ГП ОКТБ ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. Государственное предприятие "Опытное конструкторско-технологическое бюро Института электросварки им. Е. О. Патона Национальной академии наук Украины" (ГП «ОКТБ ИЭС им. Е. О.Патона НАНУ») (ул. Боженко, 15, корп. 7, г. Киев, 03150, Украина).

Zhuk Hennady – Director of SF "Experimental Design-Technological Office of the E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine" (SF "EDTO E. O. Paton EWI NASU") (15 Bozhenko Str., bld. 7, 03150 Kiev, Ukraine).

E-mail: dktbpaton@gmail.com

ORCID: https://orcid.org./0000-0001-6615-8239

Пичак Владимир Григорьевич – начальник отдела ГП ОКТБ ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. Государственное предприятие "Опытное конструкторско-технологическое бюро Института электросварки им. Е. О.Патона Национальной академии наук Украины" (ГП «ОКТБ ИЭС им. Е. О.Патона НАНУ») (ул. Боженко, 15, корп. 7, г. Киев, 03150, Украина).

Pichak Vladimir – Head of Department of SF "Experimental Design-Technological Office of the E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine" (SF "EDTO E. O. Paton EWI NASU") (15 Bozhenko Str., bld. 7, 03150 Kiev, Ukraine).

E-mail: dktbpaton@gmail.com

Патон Б., Лебедев В., Жук Г., Пичак В. Изучение особенностей воздействия импульсной подачи электродной проволоки на результаты механизированной электродуговой сварки – наплавки. *Технічні науки та технології.* 2020. № 3 (21). С. 9-20.

УДК 62-503.55
DOI: 10.25140/2411-5363-2020-3(21)-21-36

Владимир Лебедев

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УПРАВЛЯЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ ПОДАЧИ ЭЛЕКТРОДНОЙ ПРОВОЛОКИ И КОЛЕБАНИЙ ВАННЫ КАК ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ДУГОВЫХ ПРОЦЕССОВ СВАРКИ И НАПЛАВКИ

Актуальность темы исследования. *Дуговая сварка и наплавка с применением импульсной подачи электродной проволоки и механических колебаний сварочной ванны являются эффективным средствами существенного повышения качества результатов проведения технологических процессов, выполняемых механизированным или автоматическим оборудованием. Для рационального выбора параметров импульсной подачи и колебаний сварочной ванны необходима разработка математического описания результатов применения этих технологий сварки и наплавки.*

Постановка проблемы. *Для создания методик выбора параметров импульсной подачи электродной проволоки и колебаний сварочной ванны необходимо провести выбор наиболее характерных и применимых форм воздействий, изыскать способы их математического описания и методы решения уравнений, описывающих результаты их действий на технологический процесс.*

Анализ последних исследований и публикаций. *Наиболее используемыми технико-технологическими приёмами влияния на показатели качества сварного шва и наплавленного слоя, в том числе прочности, является механическое и/или тепловое влияние на сварочную ванну. В последнее время широко применимы такие методы, как периодическое воздействие магнитного поля на расплав сварочной ванны, импульсные режимы сварки и наплавки на базе заданных алгоритмов управления работой оборудования (источники сварочного тока, механизмы подачи электродной проволоки), применение дополнительного легирования наплавляемого металла, а также комбинированные методы.*

Выделение неисследованных частей общей проблемы. *Несмотря на значительный прогресс в создании новых типов оборудования для сварки и наплавки с импульсными алгоритмами функционирования, в частности, механизмов подачи с управляемыми параметрами движения до настоящего времени мало исследований, посвящённых математическому описанию действия импульсов различной формы на процессы сварки и наплавки.*

Постановка задачи. *Провести анализ факторов, влияющих на структуру металла шва и наплавленного слоя с целью повышения качества результатов процессов сварки и наплавки, выявить применяемые формы импульсных воздействий, определить математические описания импульсов, описания динамических процессов при сварке с учётом движений сварочной ванны. Найти способы решения полученных дифференциальных уравнений.*

Изложение основного материала. *Показаны результаты импульсных воздействий на структуру металла шва, обеспечивающие существенное улучшение механических свойств сварного соединения и наплавленного слоя. Выбраны и описаны в математической форме импульсы управляемого движения электродной проволоки. Найдены описания процессов при дуговом воздействии, а также движений сварочной ванны. Получены дифференциальные уравнения импульсных воздействий на результаты сварочного процесса. Решения полученных уравнений основываются на применении операционного исчисления.*

Выводы в соответствии со статьёй. *Импульсная подача электродной проволоки с управляемыми характеристиками даёт возможность существенно улучшить структуру металла шва, что в значительной степени повышает прочность сварного соединения и наплавленного слоя, а также снижают энергетические затраты и ресурсопотребление. Технология сварки и наплавки с применением импульсной подачи электродной проволоки наиболее эффективна при рационально выбранных параметрах импульсного движения проволоки, что невозможно без математического описания этого процесса. Математическое описание в доступном для практического применения виде практически исключает этап достаточно длительных и затратных экспериментальных исследований, а также позволяет прогнозировать ожидаемые результаты. Дифференциальные уравнения, описывающие импульсные воздействия, целесообразно решать методами теории автоматического регулирования, в частности с использованием операционного исчисления.*

Ключевые слова: *электродуговая сварка и дуговая наплавка; импульсная подача; анализ; форма импульса; выбор; математическое описание.*

Рис.: 1. Библ.: 20.

Актуальность темы исследования. Дуговая сварка и наплавка с использованием плавящегося электрода являются одними из основных в современных технологических процессах при создании новых объектов машиностроения, в строительстве, ремонте и восстановлении уже эксплуатирующихся узлов и деталей. Всё это находит применение при работе в самых различных условиях, в том числе и в водной среде [1] при реализации сварки мокрым способом. Развитие дуговых процессов сварки и наплавки, оборудования для их реализации базируется как на использовании всё более эффективных сварочных материалов, защитных сред, активаторов сварочного процесса, так и на постоянно совершенствующемся оборудовании и применяемым дополнительным системам [2].

© Лебедев В. О., 2020

Развиваются и постоянно совершенствуются направления, связанные с импульсными и модулированными алгоритмами работы систем сварочного оборудования, где их выходные характеристики изменяются по заданным параметрам или адаптируются к сварочному или наплавочному процессам, улучшая результаты их работы.

По нашему мнению, именно импульсные воздействия на управление сварочно-наплавочным процессом имеют широкие перспективы и будут развиваться и в дальнейшем, являться основой для новых технико-технологических решений, в том числе с комбинированием воздействий от разных генераторов импульсов.

Постановка проблемы. Целью настоящей работы является рассмотрение и анализ основных тенденций в развитии импульсных техники и технологии сварки-наплавки на основе механизма подачи электродной проволоки с определением направлений их дальнейшего совершенствования с получением аналитических выражений для оценки влияния импульсных воздействий на характеристики металла шва и энергетические параметры процесса, как основных составляющих обеспечивающих качество и экономичность получения сварных швов и наплавленных валиков.

В связи с тем, что теоретическая база по управлению процессом сварки- наплавки с использованием современных источников сварочного тока с импульсным воздействием на перенос электродного металла, в том числе и синергетическим управлением достаточно развита и описана в технической литературе, например [3; 4], в настоящем материале мы будем в большей степени уделять работе систем импульсной подачи электродной проволоки, которые также могут работать в синергетических режимах.

Следует отметить, что основное назначение импульсной системы подачи электродной проволоки это организация управляемого переноса электродного металла, при этом, в зависимости от способа управления переносом могут быть решены следующие основные задачи:

- организация переноса электродного металла с заданными частотными характеристиками (частота, скважность) и обеспечением стабильности процесса;
- управление геометрическими параметрами сварного шва и наплавленного валика.
- снижение энергетических затрат, в том числе за счёт снижения тепловложений в процесс;
- управление процессом формирования структуры металла жидкой ванны за счёт влияния на фронт кристаллизации;
- возможность ведения сварочного и наплавочных процессов с качественным результатом в положениях отличных от горизонтального;
- получение качественных результатов сварки-наплавки на обеих полярностях с использованием их положительных эффектов, в том числе формирование шва и наплавленного валика, глубины проплавления и зоны термического влияния;
- обеспечение снижения доли основного металла в структуре наплавленного упрочняющего наплавленного слоя;
- решение проблем сварки-наплавки для разных металлов (стали, в том числе нержавеющие, чугуна, сплавов алюминия) при использовании оборудования с импульсными выходными характеристиками при этом важный эффект, который можно особо отметить – это возможность качественной сварки особого вида соединений разнородных дуплексных сталей.

Достижение отмеченных результатов важно в создании атомных энергетических установок, корпусных элементов судов и других сложных и ответственных конструкций и сооружений.

Очевидно, что полный выбор всех преимуществ с использованием импульсных алгоритмов управления дуговых процессов одновременно достаточно сложен. Однако ряд эффектов одновременно можно получить, используя возможности настройки режимов и формирования параметров импульсных воздействий.

При этом полученные, а также ожидаемые результаты основываются на детальном изучении процессов и результатов управления переносом электродного металла, современных достижениях техники, а также на требованиях, предъявляемых техническим прогрессом.

Анализ последних исследований и публикаций. Получение тем или другим способам мелкозернистой первичной микроструктуры металла шва это основной фактор, позволяющий в значительной степени улучшить качество процессов электродуговой сварки и наплавки. В этом случае вредные примеси более равномерно распределяются по границам первичных зерен, снижая, таким образом, склонность к хрупкому разрушению. Уменьшить размеры столбчатых дендритов можно модифицированием, например, путем введения в сварочную ванну наночастиц оксидов титана или циркония [5], а также регулированием процесса кристаллизации, осуществляемом при малом тепловложении. Последнее можно реализовать, если использовать в полной мере возможности инверторных источников питания с синергетическим управлением, а также импульсной подачи электродной проволоки или различных способов механических колебаний сварочной ванны, в том числе и тех, которые изучаются нами.

Следует отметить, что важной особенностью применения импульсных процессов сварки и наплавки нанесение антикоррозионных покрытий, в частности при выполнении ограничений по содержанию δ-феррита, который снижает пластичность и повышает хрупкость наплавленного слоя. Импульсные алгоритмы работы современных источников сварочного тока и систем подачи электродной проволоки обеспечивают снижение тепловложения и степени перемешивания наплавляемого металла с основным, а следовательно, и содержание δ-феррита, что позволяет резко сократить объем наплавленного слоя [6].

В технической литературе рассматриваются вопросы, связанные с дендридной ликвацией в металле сварного шва или наплавленного валика как весьма нежелательного явления [7], при этом отмечены способы борьбы с ним, включая и введение разного вида механических колебаний. Введение таких колебаний может быть реализовано рядом способов, основные из которых это импульсная подача электродной проволоки, колебания свариваемого или наплавляемого изделия [8; 9], введение колебаний дополнительными устройствами [10].

Большая часть результатов, получаемых при импульсной подаче электродной проволоки связана с более интенсивными колебаниями сварочной ванны, производимыми, в том числе силовыми воздействиями дуги.

В работе [11] также рассмотрены некоторые возможности экономии электроэнергии при сварке с импульсными составляющими скорости при подаче электродной проволоки с учётом технических и технологических эффектов и возможных дополнительных затрат.

Следует указать, что непосредственные замеры расхода электроэнергии на плавление электродной проволоки при дуговой сварке со значительными колебаниями тока и напряжения процесса осуществить достаточно сложно. Требуются приборы, учитывающие изменяющийся во времени и по величине характер сварочного тока и напряжения, особенно выраженный при сварке в CO_2 с короткими замыканиями дугового промежутка.

Для оценки энергетических затрат при различных видах переноса электродного металла предложено использовать определение электроэнергии, которое необходимо для реализации сварочного процесса. При этом учитывается, что механизированная дуговая сварка осуществляется от источников с жёсткой вольтамперной характеристикой. Для этого разработана система измерения, которая применялась при определении удельных затрат электричества в пяти вариантах переноса электродного металла при сварке в среде CO_2 в случаях невозмущённой и импульсной подачи электродной проволоки СВ08Г2С диаметром 1,2 мм. Система подробно рассмотрена в работе. Имеются оригинальные системы измерения, выходным параметром которых является количество электричества,

затрачиваемое на процесс сварки. Характеристики переноса электродного металла и расходы электроэнергии с учётом адекватности затраченного электричества и электроэнергии приведены в табл. 1.

Таблица 1

Удельные расходы энергии при разных характеристиках и способах сварки

Способ переноса электродного металла	**С естественными короткими замыканиями**	**С управляемыми короткими замыканиями**		**Без коротких замыканий**	
		Ускорение в импульсе м/с^2, 20–30	Ускорение в импульсе м/с^2, 40–60	Величина импульса тока, А, 50	Величина импульса тока, А, 100
Удельный расход электричества, $q_{пл}$, А·С/мм^3	2,5–2,7	2,1–2,3	1,9–2,0	1,8	до 1,6

При исследованиях, проведенных некоторое время тому назад, использовался полуавтомат типа ПШ107И с механизмом импульсной подачи, обеспечивающий механическими устройствами регулируемую форму импульса, позволяющий получить различные ускорения электродной проволоки и выбрать из них необходимые.

В качестве источника сварочного тока выбран простой по конструкции выпрямитель типа ВС300 с регулированием напряжения холостого хода переключением обмоток трансформатора, т.е. с неискажённой формой выходного напряжения, позволяющей исключить влияние формы напряжения на плавление электродной проволоки.

Из табл. 1 видно, что на потребление энергии при сварке существенно влияет способ сварки: при импульсной подаче по сравнению с обычной (невозмущённой подачей) потребление электроэнергии снижается, при этом с увеличением ускорения движения электродной проволоки в импульсе фиксируется снижение потребления электроэнергии. Это частично подтверждено в работах [12; 13], но требует продолжения исследований в этом направлении.

Можно заключить, что параметры импульсной подачи влияют на потребление энергии при импульсном движении электродной проволоки.

Выделение неисследованных частей общей проблемы. Современные способы импульсной подачи характеризуются возможностями управления частотой, скважностью, а также формой и даже возможностью реверсирования направления движения. Такое разнообразие возможностей управления предопределяет поиск математического описания влияния импульсной подачи электродной проволоки на формирование (изменение) характеристик дугового процесса, в частности тока при сварке, наплавке с короткими замыканиями дугового промежутка. Это также относится к изысканию зависимостей влияния импульсной подачи на характеристики движения расплава сварочно-наплавочной ванны, определяющего возможности снижения роста столбчатых кристаллов.

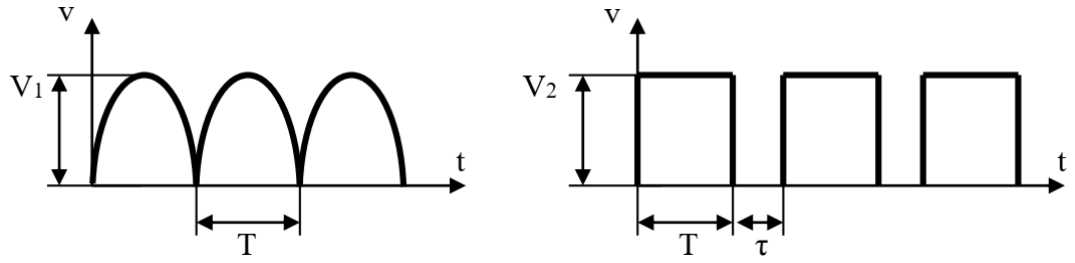
В последнее время создана новая технология дуговой сварки с дозированной подачей электродной проволоки, позволяющая решать целый ряд проблем, возникающих при реализации процессов сварки-наплавки плавящимся электродом. Подробно процесс описан в работе [14]. Благодаря новому набору параметров в ИЭС им. Е. О. Патона создана стандартная технология, обеспечивающая надежную, экономичную и высококачественную сварку с воспроизводимыми результатами и минимально необходимой доработкой сварных изделий. Широкий диапазон регулирования значительно расширяет область применения в отношении толщины материала по сравнению с аналогичными стандартными наборами параметров.

Ранее такая часть работы выполнялась по отношению к выявлению зависимости характеристик импульсной подачи на ток дугового процесса для процесса дуговой сварки плавящимся электродом в защитном газе с короткими замыканиями дугового промежутка [15]. Следует заметить, что в этой работе рассматривался, как теперь определено, только частный

случай, который относился к возможностям известных в то время механизмов импульсной подачи. К настоящему времени разработаны и реализованы в конструкциях новые системы подачи электродной проволоки, базирующиеся на применении безредукторных механизмов с вентильными электродвигателями с микропроцессорным управлением и регулированием. Такие системы позволят получить импульсное движение электродной проволоки, практически с любыми алгоритмами формирования законов этого движения.

Постановка задачи. Для реализации возможностей наиболее эффективного использования импульсных воздействий на сварочный процесс и непосредственно ванну расплавленного металла необходимо получение математического описания влияния характеристик импульсного движения на ток процесса и движение расплава металла ванны. Влияние скорости подачи электродной проволоки на сварочный ток можно изучать, задавая различные законы движения проволоки.

Изложение основного материала. Для решения этой задачи формализуем формы импульсов подачи. При этом определим две основные применяемые формы: практически синусоидальную (модуль синуса) и приближающуюся к прямоугольной. Такая формализация графически представлена на рис. 1.



а *б*

Рис. 1. Идеализированные формы импульсной подачи электродной проволоки: а – синусоидальная, б – приближенная к прямоугольной

Математические описание импульсов подачи электродной проволоки синусоидальной по модулю формы, представленных на рис. 1 будет иметь виды (рис. 1, *а*).

$$f_1(t) = V_1\left|\sin \omega t\right| \quad \omega \geq 0 \tag{1}$$

где V_1 – амплитудное значение скорости импульсной подачи электродной проволоки; ω – частота следования импульсов (рис. 1, *б*).

$$f_2(t) = \begin{cases} V_2, & nT \leq t \leq nT + \tau \\ 0, & nT + \tau \leq t \leq (n+1)T, \quad n = 1,2,3\ldots \end{cases} \tag{2}$$

где V_2 – величина прямоугольного импульса; T, τ – время действия импульса и паузы прямоугольного импульса соответственно.

Существует ряд способов математического описания переходных процессов при различных воздействиях, которые, как правило, базируются на математическом аппарате теории автоматического регулирования. Анализируя эти способы нами выбран, по нашему мнению, наиболее рациональный для тех задач, которые определяют параметры при импульсных влияниях со стороны системы подачи электродной проволоки – это использование операционного исчисления, математический аппарат которого известен и достаточно широко применяется, в том числе, и при исследовании переходных процессов.

Далее рассмотрим математическое описание процессов, происходящих в объекте исследования – дуговом процессе при импульсном воздействии со стороны подачи плавящейся электродной проволоки и сделаем это в двух аспектах:

- нахождение тока дугового процесса в зависимости от параметров импульсов движения проволоки, что является необходимым, в том числе и для решения задач определения энергетических характеристик процесса сварки при импульсном воздействии со стороны системы подачи;

- нахождение параметров колебаний ванны жидкого металла, зависящих от характеристик импульсов, что определяет характер движения расплава, а в итоге качество металла шва при импульсном воздействии при подаче электродной проволоки.

В цитируемой работе [15] выведено уравнение, связывающее ток дугового процесса и скорость подачи электродной проволоки для дуговой сварки плавящимся электродом в защитном газе с короткими замыканиями дугового промежутка в операторной форме в виде изображения. Используем его в следующем виде

$$\frac{i(p)}{v(p)} = \frac{\dfrac{E}{(R+0,5b)}}{Tp^2 + p + k}, \tag{3}$$

где i, v – текущие значения тока дугового процесса и скорости подачи электродной проволоки соответственно; p – оператор дифференцирования;

$$T = \frac{L}{R+0,5b}; \quad k = \frac{AHE}{R+0,5b},$$

где, в свою очередь L, R – индуктивность и эквивалентное сопротивление сварочной цепи соответственно; b – коэффициент, характеризующий наклон статической характеристики дуги к оси токов; E – напряжённость электрического поля в столбе дуги; $A = \dfrac{1}{M\pi r^2}$; $H = U_{xx}(0,285 - 0,0052U)$, где U_{xx} – напряжение холостого хода источника сварочного тока, а $M = C_n\gamma_n T_n - C_o\gamma_o T_o + r_o\gamma_o$, где C_n, C_o – теплоёмкость металла при температурах плавления и окружающей среды соответственно; γ_n, γ_o – плотность металла при температурах плавления и окружающей среды соответственно; r_n –скрытая теплота плавления; T_n, T_o – температура плавления электродного металла и температура окружающей среды соответственно.

В работе [16] показано, что в процессе кристаллизации (в зоне роста дендридов) присутствуют четыре основных физических явления: теплопередача, рост кристаллов, переход примесей, движение жидкого металла, которое можно описать дифференциальным уравнением. При этом получено дифференциальное уравнение динамической системы кристаллизации сварочно-наплавочной ванны в каноническом виде, которое при начальных нулевых условиях и исследовании влияния изменяющихся воздействий системы на кристаллизацию металла, в частности импульсной подачи электродной проволоки, можно представить в виде Лапласова изображения. Опираясь на результаты исследования [17] и учитывая цели настоящей работы запишем несколько преобразованное уравнение, которое связывает скорость импульсной подачи электродной проволоки и движение расплавленного металла в операторной форме, по которому можно судить о степени влияния характеристик импульсов на интенсивность указанного движения, а, следовательно, на рост дендридов кристаллизующего металла в виде изображения:

$$\frac{v_в(P)}{v(p)} = \frac{bp + b_1}{c_1p^2 + c_2p + c_3}, \tag{4}$$

где $v_в$ – текущее значения колебаний сварочной ванны соответственно

$$b = B + C = (1 - k_0)\frac{c_0 S_1 N_1 \mu_1}{l_0 S_0} + C,$$

где в свою очередь k_0 – равновесный коэффициент распределения примесей (для стали и углерода k_0 = 0,46); c_0 – исходная концентрация примеси в расплаве ванны; S_1, N_1 – коэффициенты описывающие состояние примесей в расплаве; μ_1 – коэффициент роста скорости движения фронта кристаллизации от переохлаждения; l_0 – протяжённость зоны активного роста дендридных зародышей S_0, C – состав и концентрация примесей в зоне расплава активного роста дендридных зародышей; $b_1 - \frac{\mu_1 \gamma}{l_0}$, где γ – плотность расплава; $c_1 = 1$; $c_2 = \frac{k_m + k_d}{l_0}$, где k_m – коэффициент массопередачи; $k_d = \frac{(1 - k_0)\beta_0 C_0 s_1 N_1 \mu_1}{S_0}$, где β_0 – коэффициент падения температуры ликвидус в сплаве; C_0 – коэффициент примеси в жидкой фазе; $c_3 = \frac{\beta_0 \mu_1 \gamma}{l_0}$.

В уравнении (4) величины $x_{вх}(p)$ и $x_{вых}(p)$ обозначают входной и выходной сигналы соответственно. В качестве входных сигналов применяются импульсные воздействия, представленные на рис. 1, с их представлениями, данными в выражениях (1), (2).

Важной является возможность оценки методами теории автоматического регулирования устойчивости систем, описываемых уравнениями (3), (4) при импульсном воздействии со стороны системы подачи электродной проволоки.

Определены раздельно математические описания двух типов входных сигналов для двух видов их влияний на сварочный процесс. Для того чтобы иметь полные математические описания систем входной сигнал – результат его действия, необходимо их привести к единому виду. Это может быть полное использование методов операционного исчисления, тогда сигналы входных воздействий необходимо представить в виде соответствующих изображений. Вторым способом можно воспользоваться, представив сигналы воздействий в удобном для исследований математическом описании и операторные изображения передаточных функций (3), (4) в виде их оригиналов.

Выполним все эти преобразования для определения в дальнейшем наиболее эффективного способа исследования полученных и получаемых уравнений, используя методы теории автоматического регулирования [18]. При этом, как известно, изображение функции периодической последовательности импульсов для примера с длительностью сигналов принятые условно как δ и периодом T в общем виде и для возможности выбора характеристик импульсных входных воздействий выглядит следующим образом:

$$F(p) = \frac{1 - e^{-\delta p}}{p(1 - e^{-\delta T})}. \quad (5)$$

Используя функцию Хевисайда

$$\varphi(t - \delta) = \begin{Bmatrix} 0, t \le \delta \\ 1, t \ge \delta \end{Bmatrix}, \quad (6)$$

можно записать, что импульсная ступенчатая функция времени t с периодом T имеет вид:

$$f(t) - A - A\phi(t-\delta) = \begin{Bmatrix} A, 0 \le t \le \delta \\ 0, \delta \le t \le T \end{Bmatrix}, \quad (7)$$

где $A = cons$.

Для периодической последовательности импульсов с длительностью сигналов δ и периодом T оригинал изображения $F(p)$ можно записать как:

$$f(t) = A - A\varphi(t-\delta) + A\varphi(t-T) - A(t-T-\theta) + A\varphi(t-2T - A\varphi(t-2T-\varphi) + \ldots, \quad (8)$$

Учитывая периодичность функции $f(t)$ для анализа поведения системы достаточно рассматривать ее значение на протяжении одного периода T следования импульсов. Такое условие обусловлено необходимостью требования технологического процесса импульсной подачи электродной проволоки обеспечить в начале каждого последующего периода следования импульсов нулевые начальные условия работы системы. В противном случае будет нарушено течение сварочного процесса.

Представим выражение (1) для $f_1(t)$ используя табличные данные в операторной форме:

$$V_1 \left|\sin \omega t\right| \leftrightarrow V_1 \frac{\omega ctg(\frac{\pi p}{2\omega})}{(p^2 + \omega^2)} \quad (9)$$

Выражение (2) для $f_2(t)$, при использовании табличных данных в операторной форме примет вид:

$$\begin{matrix} V_2, & nT \le t \le nT + \tau \leftrightarrow f_2(t) \leftrightarrow \dfrac{V_2(1 - e^{-pt})}{p(1 - e^{-pT})} \\ 0, & nT + \tau \le t \le (n+1)T \end{matrix} \quad (10)$$

Можно записать 4 уравнения, описывающие в операторной форме зависимости между выходными параметрами и входным импульсным воздействием используя полученные уравнения (3) и (4) в выражениях (9) и (10)

1. Обозначив величину $\frac{E}{(R + 0{,}5b)} = H$, получим выражение в операторной форме, определяющее ток дугового процесса $i(p)$ для импульса по (1)

$$i_1(p) = V_1 \frac{\omega ctg(\frac{\pi p}{2\omega})}{(p^2 + \omega^2)} \frac{H}{Tp^2 + p + k} \quad (11)$$

2. Для импульса по (2)

$$i_2(p) = \frac{V_2(1 - e^{-pt})}{p(1 - e^{-pT})} \frac{H}{Tp^2 + p + k} \quad (12)$$

3. Для определения влияния импульсной подачи электродной проволоки на движение в ванне жидкого металла $v_1(p)$ можно для входного импульса по (1) записать

$$v_1(p) = V_1 \frac{\omega ctg(\frac{\pi p}{2\omega})}{(p^2 + \omega^2)} \frac{bp + b_1}{c_1 p^2 + c_2 p + c_3} \quad (13)$$

4. Влияние действия импульсной подачи по (2) на характеристики движений в сварочной ванне $v_2(p)$ описывается следующим образом:

$$v_2(p) = \frac{V_2(1-e^{-pt})}{p(1-e^{-pT})} \frac{bp+b_1}{c_1p^2+c_2p+c_3} \tag{14}$$

Уравнения (11), (12), (13), (14), при их решении дают возможность определить характер переходного тока для тока дугового процесса и движения в жидкой ванне от двух типов импульсных воздействий. Решение этих уравнений, т. е. нахождение оригиналов возможно машинными способами или с использованием упрощений, которые дают разложения в степенные ряды, например, в ряд Тейлора. Применяя такие разложения с несколькими членами можно с достаточными по точности результатами получить изображения входных сигналов в упрощённом виде.

Для (11) получим упрощённое применением степенных рядов Тейлора выражение

$$ctg(\frac{\pi p}{2\omega}) \approx \frac{1}{\frac{\pi p}{2\omega}} - \frac{\pi p}{3(2\omega)}... \tag{15}$$

Упрощённое выражение для $f_1(t)$ будет иметь вид:

$$f_1(t) = V_1 \frac{2\omega^2(\frac{1}{\pi} - \frac{\pi p^2}{6\omega})}{p(p^2+\omega^2)}. \tag{16}$$

Для (10), разложение имеет вид:

$$\frac{(1-e^{-pt})}{p(1-e^{-pT})} \approx \frac{1-(1-pt+\frac{p^2t}{2})}{p[1-(1-p\tau+\frac{p^2\tau}{2})]}.... \tag{17}$$

После несложного преобразования упрощённое выражение для $f_2(t)$ будет иметь вид

$$f_2(t) = V_2 \frac{2t-p}{p(2\tau-p)}. \tag{18}$$

Упрощённые математические описания входных импульсов могут быть по аналогии с (11), (12), (13), (14) применены для формирования уравнений, определяющих результат воздействия на процесс сварки с импульсной подачей электродной проволоки с управляемыми параметрами.

Рассмотрим следующий способ исследования влияния импульсной подачи электродной проволоки на характеристики результатов дугового процесса. При этом следует найти обычные выражения для входных сигналов (1) и (2) и оригиналы выражений для изображений (3), (4).

Для входных сигналов по рис. 1*, а, б* наиболее рациональный путь – это их представление в виде разложения в ряд Фурье. При этом аппроксимация функции различной формы для импульса по форме (1) в общем случае:

$$f_1(t) = V_1(\frac{2}{3} - \frac{3}{\pi^2}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1-\cos\frac{2\pi n}{3}}{n^2})\cos\frac{2\pi x n}{3} \tag{19}$$

Из уравнения (19) возьмём несколько членов, что достаточно для точности наших исследований и после преобразований получим

$$f_1(t) = V_1[\frac{2}{3} - \frac{3}{\pi^2}(\frac{3}{2}cos\ \frac{2\pi x}{3} + \frac{3}{8}\cos\frac{4\pi x}{3})] \quad (20)$$

Для прямоугольного или близкого к нему импульса по форме (2) с использованием общего представления

$$f_2(t) = V_2[\frac{1}{2} + \frac{2}{\pi}\sum_{k=1}^{\infty}\ \frac{1}{2k}\sin(\frac{2k-1}{L}\pi x)], \quad (21)$$

Из уравнения (21) возьмём несколько членов, что также достаточно для точно наших исследований и после преобразований получим

$$f_2(t) = V_2[\frac{1}{2} + \frac{2}{\pi}(\frac{1}{2}\sin(\frac{1}{L}\pi x) + \sin\frac{3\pi x}{4L})], \quad (22)$$

где L – период длительности импульса.

Найдём оригинал выражения (3) с указанной выше заменой как $F_3(p)$, используя табличные преобразования оригиналов в изображения и выполнив следующие замены и подстановки

$$\frac{H}{Tp^2 + p + k} = \frac{H}{T(p^2 + \frac{p}{T} + \frac{k}{T})};$$

$$\frac{g}{(p+j)^2 + g^2} = \frac{g}{p^2 + 2pj + j^2 + g^2};$$

$$2j = \frac{1}{T} \Rightarrow j = \frac{1}{2T};$$

$$\frac{k}{T} = j^2 + g^2 \Rightarrow g = \sqrt{\frac{k}{T} - j^2} \Rightarrow g = \sqrt{\frac{k}{T} - \frac{1}{4T^2}} \quad (23)$$

в результате приведения получим следующее выражение для стандартного вида изображения:

$$F_3(p) = \frac{H}{Tp^2 + p + k} = \frac{H}{T(p^2 + \frac{p}{T} + \frac{k}{T})} = \frac{H}{gT}\frac{g}{(p+j)^2 + g^2}. \quad (24)$$

Оригинал изображения функции $F_3(p)$ будет иметь вид

$$f_3(t) = \frac{H}{gT}e^{-jt}\sin(gt). \quad (25)$$

Используя процедуру стандартного приведения изображения функции для выражения (4) в виде $F_4(p)$

$$F_4(p) = \frac{bp + b_1}{c_1p^2 + c_2p + c_3} \quad (26)$$

возможно прийти к стандартному выражению вида

$$F_4(p) = \frac{p + a}{(p+a)^2 + b^2}. \quad (27)$$

Для использования стандартного выражения выполним подстановку

$$a = \frac{c_2}{2c_1};\ \ b = \sqrt{\frac{c_2}{c_1} - \frac{c_2^2}{4c_1^2}}. \tag{28}$$

Приведём всю цепочку преобразований для получения исходного выражения изображения $F_4(p)$ в определении её оригинала $f_4(t)$

$$F_4(p) = \frac{b_1 p + b_2}{c_1 p^2 + c_2 p + c_3} = \frac{b_1}{c_1} \frac{p + \frac{c_2}{2c_1}}{(p + \frac{c_2}{2c_1}) + \frac{c_3}{4c_1^2}} + \frac{(b_2 - \frac{c_2 b_1}{2c_1})}{c_1 \sqrt{\frac{c_3}{c_1} - \frac{c_2^2}{4c_1^2}}} \frac{\sqrt{\frac{c_3}{c_1} - \frac{c_2^2}{4c_1^2}}}{(p + \frac{c_2}{2c_1})^2 + \frac{c_3}{c_1} - \frac{c_2^2}{4c_1^2}} =$$

$$= \frac{b_1}{c_2} \frac{p + a}{(p + a)^2 + b^2} + \frac{(b_2 - \frac{c_2 b_1}{2c_1})}{c_1 b} \frac{b}{(p + a)^2 + b^2}. \tag{29}$$

Оригинал изображения (11) функции $F_4(p)$

$$f_4(t) = \frac{b_1}{c_1} e^{-at} \cos bt + \frac{b_2 - \frac{c_2 b_1}{2c_1}}{c_1 b} e^{-at} \sin bt. \tag{30}$$

Используя выводы для оригинала можно с некоторым приближением в аналитическом виде найти изменения тока дугового процесса $i_1(t)$ при действии импульсов:

по форме (1)

$$i_1(t) = V_1[\frac{2}{3} - \frac{3}{\pi^2}(\frac{3}{2} cos\ \frac{2\pi x}{3} + \frac{3}{8} \cos \frac{4\pi x}{3})]\ \frac{H}{gT} e^{-jt} \sin(gt), \tag{31}$$

по форме (2)

$$i_2(t) = \ f_2(t) = V_2[\frac{1}{2} + \frac{2}{\pi}(\frac{1}{2} \sin(\frac{1}{L} \pi x) + \sin \frac{3\pi x}{4L})]\ \frac{H}{gT} e^{-jt} \sin(gt). \tag{32}$$

С некоторым приближением в аналитическом виде найти изменения скорости колебаний ванны жидкого металла $v_1(t)$ при действии импульсов:

по форме (1)

$$v_1(t)\ V_1[\frac{2}{3} - \frac{3}{\pi^2}(\frac{3}{2} cos\ \frac{2\pi x}{3} + \frac{3}{8} \cos \frac{4\pi x}{3})]\ (\frac{b_1}{c_1} e^{-at} \cos bt + \frac{b_2 - \frac{c_2 b_1}{2c_1}}{c_1 b} e^{-at} \sin bt), \tag{33}$$

по форме (2)

$$v_2(t)\ \ f_2(t) = V_2[\frac{1}{2} + \frac{2}{\pi}(\frac{1}{2} \sin(\frac{1}{L} \pi x) + \sin \frac{3\pi x}{4L})];$$

$$(\frac{b_1}{c_1} e^{-at} \cos bt + \frac{b_2 - \frac{c_2 b_1}{2c_1}}{c_1 b} e^{-at} \sin bt). \tag{34}$$

Для определения оригинала от произведения изображений, как известно, используют теорему о свертке (умножении) их оригиналов [18]. В общем виде выражение свертки оригиналов имеет вид:

$$f_1(t)\ {}^{*} f_2(t) = \int_0^t f_1(t-\theta) f_2(\theta) d\theta \leftarrow F_1(p) F_2(p), \tag{35}$$

где $f_i(t),\ f_2(t)$ – функции времени; $F_1(p),\ F_2(p)$ – их изображения по Лапласу, соответственно.

При применении теоремы свёртки в нашем случае можно использовать как исходные описания. При использовании исходных описаний получим свёртку для определения переходного процесса по току $i_i(t)$ при воздействии по типу (1) в виде

$$i_i(t) = \frac{V_1 H}{gT} \int_0^t \left|\sin \omega(t-\tau)\right| e^{-j\tau} \sin g\tau) d\tau, \tag{36}$$

где $0 < t < \tau.$

Найдём выражение для свёртки при определении переходного процесса по скорости движения ванны $v_i(t)$ при воздействии по типу (1) в виде

$$v_1(t) = V_1 \int_0^t \left|\sin \omega(t-\tau)\right| \left(\frac{b_1}{c_1} e^{-\tau a} \cos b\tau + \frac{b_2 - \dfrac{c_2 b_1}{2c_1}}{c_1 b} e^{-a\tau} \sin b\tau \right) d\tau, \tag{37}$$

где $0 < t < \tau$.

Заметим, что выражение для входного сигнала по форме (2) можно записать в виде

$$f(t) = A - A\varphi(t-\delta). \tag{38}$$

Свёртка для определения переходного процесса по току дугового процесса $i_2(t)$ при воздействии по типу (2) в виде

$$i_2(t) = \frac{V_1 H}{gT} \int_9^t [A - A\varphi(t-\tau)] e^{-j\tau} \sin g\tau) d\tau, \tag{39}$$

где $0 < t < \tau.$

Найдём выражение для свёртки при определении переходного процесса по скорости движения ванны $v_2(t)$ при воздействии по типу (2) в виде

$$v_2(t) = \int_0^t [A - A\varphi(t-\tau)] \left(\frac{b_1}{c_1} e^{-\tau a} \cos b\tau + \frac{b_2 - \dfrac{c_2 b_1}{2c_1}}{c_1 b} e^{-a\tau} \sin b\tau \right) d\tau. \tag{40}$$

Интегралы выражений (37), (39), (40) можно при необходимости и интересе к данному исследованию вычислить, используя соответствующие калькуляторы.

Следует отметить, что импульсные процессы сварки и наплавки могут быть использованы не только при сварке и наплавке в среде защитных газов, но и при применении порошковых электродных проволок, а также в других способах дуговой сварки, например [19; 20].

Рассмотренные два способа решения задачи определения зависимостей тока дугового процесса и колебаний сварочной ванны от наиболее применимых форм импульсной подачи электродной проволоки достаточно точны для анализа исследуемых импульсных процессов и результатов их действия.

Выводы в соответствии со статьей.

Импульсные методы воздействия на процессы дуговой сварки и наплавки плавящимся электродом оказывают значительные эффекты на технологические результаты, способствуя образованию наиболее качественных структур как наплавленного металла, так и околошовной зоны, а также существенно влияют на снижение энергетических затрат, при этом значительных результатов можно достичь, используя импульсные алгоритмы функционирования систем подачи с управляемыми параметрами.

Известные результаты воздействия на различные характеристики дугового процесса импульсных способов подачи электродной проволоки не могут быть таковыми, которые в полной мере описывают исследуемые явления по току и колебаний ванны, так как не позволяют заранее устанавливать параметры импульсного движения электрода без экспериментальных работ, следовательно, необходимы математические описания ожидаемых результатов от задаваемых вариантов импульсов.

Наиболее эффективными способами математического описания воздействий импульсной подачи электродной проволоки являются способы, используемые в математическом аппарате теории автоматического регулирования, в частности операционного исчисления, при этом основой такого исследования являются описания исследуемых фрагментов технологического процесса с их представлением в виде уравнений операционного исчисления, а также описания формализованных импульсов наиболее применяемых форм.

Полученные результаты в виде как приближённых, так и точных уравнений, описывающих исследуемые воздействия с меньшей и большей трудоёмкостью применения, с достаточной точностью для выбора параметров импульсных воздействий для оценки и прогнозирования описывают необходимые для получения качественного результата как по составу метала шва, так и по энергосбережению.

Список использованных источников

1. Патон Б. Е. Проблемы сварки на рубеже веков. *Автоматическая сварка.* 1999. № 1. С. 4–14.

2. Бадьянов Б. Н. Некоторые проблемы технологии сварки на рубеже веков. *Сварочное производство*. 2000. № 1. С. 8–11.

3. Joseph A., Farson D., Harwig D., Richardson R. Influence of GMAW-P current waveforms on heat input and weld bead shape. *Science and Technology of Welding and Joining*. 2005. Vol 10, No 3. Pp. 311–318.

4. Manikya Kanti K., Srinivasa Rao P., Ranga Janardhana G. Optimization of Weld Bead Penetration in Pulsed Gas Metal Arc Welding using Genetic Algorithm. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. 2013. Vol. 3, Issue 3. P. 368–371.

5. Колоколов Е. И., Томилин С. А., Шишов В. В. Обеспечение конструктивной прочности сварных соединений реакторных установок посредством применения новых сварочных материалов и технологий. *Глобальная ядерная безопасность*. 2017. № 3. С. 77–90.

6. Оборудование и трубопроводы атомных энергетических установок. Сварные соединения и наплавка. Правила контроля. ПНАЭ Г7-010-89. Нормативный документ. Москва : НТЦ ЯРБ, 2000. 164 с.

7. Морозов, В. П. Анализ условий формирования измельченной структуры при кристаллизации металла сварочной ванны с наложением внешних периодических возмущений. *Известия Высших Учебных Заведений. Машиностроение*. 2006. № 8. С. 41–54.

8. Zhao Y., Lee P.-S., Chung H. Effect of pulsing parameters on drop transfer dynamics and heat transfer behavior in pulsed gas metal arc welding. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019. Vol. 129. Pp. 1110-1122. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.10.037.

9. Технологические характеристики автоматической наплавки под флюсом с высокочастотными колебаниями электрода / В. А. Лебедев, С. В. Драган, Ж. Г. Голобородько и др. *Автоматическая сварка.* 2014. № 8. С. 35–38.

10. Lebedev V. A., Solomichuk T. G., Novykov S. V. Study if a Welding Harmonic Oscillation influence on the Welded Metal Hardness and Weld Bead Width. *Journal of engineering sciences.* 2019. Vol. 6. P. 16–21.

11. Лебедев В. А. Энергосбережении при электродуговой механизированной и автоматической сварке с импульсной подачей электродной проволоки. *Автоматизация и современные технологии.* 2014. № 1. С. 34–38.

12. Лебедев В. А. Особенности управления процессом сварки плавящимся электродом с импульсной подачей электродной проволоки. *Сварка и Диагностика*. 2014. № 1. С. 16–18.

13. Лебедев В. А., Жук Г. В. Энергетические затраты при механизированной дуговой сварке и наплавке. *Modern question of production and repair in industry and in transport* : materials of 18th international scientific and technical seminar (February 10-16, 2018). Brno, Czech Republic, 2018. С. 159–161.

14. Лебедев В. А., Жук Г. В. Управление переносом электродного метала на основе импульсных алгоритмов функционирования систем с дозированием подачи электродной проволоки при механизированной дуговой сварке. *Тяжёлое Машиностроение.* 2017. № 6. С. 27–32.

15. Лебедев В. А. Повышение эффективности сварочного оборудования на основе исследования импульсных воздействий в системе подачи электродной проволоки : дис. … д-ра техн. наук / Институт электростварки им. Е.О. Патона, НАН Украины. Киев, 2010. 327 с.

16. Самойлович Ю. А. Системный анализ кристаллизации слитка. Киев : Наукова думка, 1983. 242 с.

17. Казанский А. А., Игнатьев А. А. Исследование устойчивости фронта дендридной кристаллизации сварочно-наплавочного шва как динамической системы. *Вестник СГТУ*. 2010. № 1. С. 48–53.

18. Бесекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического регулирования. Москва : Наука, 1975.

19. Nadzam J. Tandem GMAW: The Flexibility of Pulsed Spray Transfer. *Welding Innovation*. 2002. Vol. XIX, No. 2. P. 18–21.

20. Goecke S., Hedegård J., Lundin M. Tandem MIG/MAG Welding. Svetsaren, 2001. No. 2-3. Pp. 24–28.

References

1. Paton, B. E. (1999). Problemy svarki na rubezhe vekov [Problems of welding at the turn of the century]. *Avtomaticheskaia svarka – Automatic welding*, 1, 4–14.

2. Badianov, B. N. (2000). Nekotorye problemy tekhnologii svarki na rubezhe vekov [Some problems of welding technology at the turn of the century]. *Svarochnoe proizvodstvo – Welding production*, 1, pp. 8–11.

3. Joseph A., Farson D., Harwig D., Richardson R. (2005). Influence of GMAW-P current waveforms on heat input and weld bead shape. *Science and Technology of Welding and Joining*, *10*(3), pp. 311–318.

4. Manikya Kanti, K., Srinivasa, Rao P., Ranga Janardhana, G. (2013). Optimization of Weld Bead Penetra-tion in Pulsed Gas Metal Arc Welding using Genetic Algorithm. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, *3*(3), pp. 368–371.

5. Kolokolov, E. I., Tomilin, S. A., Shishov, V. V. (2017). Obespechenie konstruktivnoi prochnosti svarnykh soedinenii reaktornykh ustanovok posredstvom primeneniia novykh svarochnykh materialov i tekhnologii [Ensuring the structural strength of welded joints of reactor plants through the use of new welding materials and technologies]. *Globalnaia iadernaia bezolasnost – Global nuclear safety*, 3, pp. 77–90.

6. Oborudovanie i truboprovody atomnykh energeticheskikh ustanovok. Svarnye soedineniia i naplavka. Pravila kontrolia. PNAE G7-010-89. Normativnyi dokument [Equipment and pipelines of nuclear power plants. Welded joints and surfacing. Control rules. PNAE G7-010-89. Normative document]. (2000). NTCz YaRB.

7. Morozov, V. P. (2006). Analiz uslovii formirovaniia izmelchennoi struktury pri kristallizatsii metalla svarochnoi vanny s nalozheniem vneshnikh periodicheskikh vozmushhenii [Analysis of the conditions for the formation of a ground structure during crystallization of the weld pool metal with the imposition of external periodic disturbances]. *Izvestiia Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Mashinostroenie – Proceedings of Higher Educational Institutions. Mechanical engineering*, 8, pp. 41–54.

8. Zhao, Y., Lee, P.-S., Chung, H. (2019). Effect of pulsing parameters on drop transfer dynamics and heat transfer behavior in pulsed gas metal arc welding. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 129, pp. 1110–1122. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.10.037.

9. Lebedev, V. A., Dragan, S. V., Goloborodko, Zh. G. et al. (2014). Tekhnologicheskie kharakteristiki avtomaticheskoi naplavki pod fliusom s vysokochastotnymi kolebaniiami elektroda [Technological characteristics of automatic submerged arc surfacing with high-frequency oscillations of the electrode]. *Avtomaticheskaia svarka – Automatic welding*, 8, pp. 35–38.

10. Lebedev, V. A., Solomichuk, T. G., Novykov, S. V. (2019). Study if a Welding Harmonic Oscillation influ-ence on the Welded Metal Hardness and Weld Bead Width. *Journal of engineering sciences,* 6, pp. 16–21.

11. Lebedev, V. A. (2014). Energosberezhenii pri elektrodugovoi mekhanizirovannoi i avtomaticheskoi svarke s impulsnoi podachei elektrodnoi provoloki [Energy saving in electric arc mechanized and automatic welding with pulse feed of electrode wire]. *Avtomatizatsiia i sovremennye tekhnologii – Automation and modern technologies*, 1, pp. 34–38.

12. Lebedev, V. A. (2014). Osobennosti upravleniia protsessom svarki plaviashhimsia elektrodom s impulsnoi podachei elektrodnoi provoloki [Features of control over the process of consumable electrode welding with pulsed electrode wire]. *Svarka i Diagnostika – Welding and Diagnostics*, 1, pp. 16–18.

13. Lebedev, V. A., Zhuk G. V. Energeticheskie zatraty pri mekhanizirovannoi dugovoi svarke i naplavke [Energy costs in mechanized arc welding and surfacing]. In *Modern question of production and repair in industry and in transport: materials of 18th international scientific and technical seminar – Modern question of production and repair in industry and in transport: materials of the 18th international scientific and technical seminar* (February 10-16, 2018) (pp. 159–161). Brno, Czech Republic.

14. Lebedev, V. A., Zhuk, G. V. (2017). Upravlenie perenosom elektrodnogo metala na osnove impulsnykh algoritmov funktsionirovaniia sistem s dozirovaniem podachi elektrodnoi provoloki pri mekhanizirovannoi dugovoi svarke [Control of the transfer of electrode metal on the basis of pulsed algorithms for the functioning of systems with dosing of the electrode wire feed in mechanized arc welding]. *Tyazhyoloe Mashinostroenie – Heavy Engineering*, 6, pp. 27–32.

15. Lebedev, V. A. (2010). *Povyshenie effektivnosti svarochnogo oborudovaniia na osnove issledovaniia impulsnykh vozdeistvii v sisteme podachi elektrodnoi provoloki [Improving the efficiency of welding equipment on the basis of the study of impulse effects in the electrode wire feed system]* [PhD dissertation, Electric Welding Institute E.O. Paton, NAS of Ukraine].

16. Samojlovich, Yu. A. (1983). *Sistemnyi analiz kristallizatsii slitka [System analysis of ingot crystallization]*. Naukova dumka.

17. Kazanskii, A. A., Ignatev, A. A. (2010). Issledovanie ustojchivosti fronta dendridnoj kristallizaczii svarochno-naplavochnogo shva kak dinamicheskoj sistemy [Study of the stability of the dendridic crystallization front of the welding-surfacing seam as a dynamic system]. *Vestnik SGTU – Bulletin of SSTU*, 1, pp. 48–53.

18. Besekerskii, V. A., Popov, E. P. (1975). *Teoriia sistem avtomaticheskogo regulirovaniia [Theory of automatic control systems]*. Nauka.

19. Nadzam J. (2002). Tandem GMAW: The Flexibility of Pulsed Spray Transfer. *Welding Innovation, XIX*(2), pp. 18–21.

20. Goecke S., Hedegård J., Lundin M. (2001). Tandem MIG/MAG Welding. Svetsaren, 2-3, pp. 24–28.

UDC 4562-503.55

Vladimir Lebedev

USE OF CONTROLLED PARAMETERS OF ELECTRODE WIRE SUPPLY AND THE POOL VIBRATION AS DYNAMIC SYSTEMS FOR IMPROVING THE ARC WELDING AND SURFACING PROCESSES

Urgency of the research. *Arc welding and surfacing with the use of pulse feed of electrode wire and mechanical vibrations of the weld pool are effective means of significantly improving the quality of the results of technological processes performed by mechanized or automatic equipment. For a rational choice of the parameters of pulse feed and oscillations of the weld pool, it is necessary to develop a mathematical description of the results of the application of these welding and surfacing technologies.*

Target setting. *To create methods for choosing the parameters of the pulse feed of the electrode wire and oscillations of the welding pool, it is necessary to select the most characteristic and applicable forms of influences, find ways of their mathematical description and methods for solving equations describing the results of their actions on the technological process.*

Actual scientific researches and issues analysis. *The most used technical and technological methods of influencing the quality indicators of the weld and deposited layer, including the strength, is the mechanical and / or thermal effect on the weld pool. Recently, methods such as the periodic effect of a magnetic field on the melt of the weld pool, pulsed modes of welding and surfacing based on specified algorithms for controlling the operation of equipment (welding current sources, electrode wire feeders), the use of additional alloying of the deposited metal have been widely applied as well as combined methods.*

Uninvestigated parts of general matters defining. *Despite significant progress in the creation of new types of equipment for welding and surfacing with pulse algorithms of functioning, in particular, feed mechanisms with controlled motion parameters, there are still few studies devoted to the mathematical description of the effect of pulses of various shapes on the welding and surfacing processes.*

The research objective. *To analyze the factors affecting the structure of the weld metal and the deposited layer in order to improve the quality of the results of surfacing welding processes, to identify the applied forms of impulse effects, to determine the mathematical descriptions of impulses, descriptions of dynamic processes in welding, taking into account the movements of the weld pool. Find ways to solve the resulting differential equations.*

The statement of basic materials. *The results of pulsed impacts on the weld metal structure are shown, which provide a significant improvement in the mechanical properties of the welded joint and the deposited layer. Pulses of the controlled motion of the electrode wire are selected and described in mathematical form. The descriptions of the processes under arc action, as well as the movements of the weld pool are found. Differential equations of impulse effects on the results of the welding process are obtained. The solutions of the obtained equations are based on the application of operational calculus.*

Conclusions in accordance with the article. *Pulse feeding of electrode wire with controlled characteristics makes it possible to significantly improve the structure of the weld metal, which significantly increases the strength of the welded joint and deposited layer, and also reduces energy costs and resource consumption. The technology of welding and surfacing with the use of a pulse feed of an electrode wire is most effective with rationally selected parameters of the pulse movement of the wire, which is impossible without a mathematical description of this process. The mathematical description in a form accessible for practical application practically excludes the stage of rather lengthy and costly experimental research, and also allows predicting the expected results. Differential equations describing impulse influences, it is advisable to solve the methods of the theory of automatic control, in particular, using operational calculus.*

Keywords: *electric arc welding and arc surfacing; impulse feed; analysis; pulse shape; choice; mathematical description. Fig.: 1. Table: 1. References: 20.*

Лебедев Владимир Александрович – доктор технических наук, профессор кафедры сварки, Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, Херсонский филиал (просп. Ушакова, 44, г. Херсон, 73022, Украина).
Lebediev Volodymyr – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Welding, National University of Shipbuilding named by admiral Makarov, Kherson branch (44 Ushakova Av., 73022 Kherson, Ukraine).
E-mail: valpaton@ukr.net
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0391-6113

Лебедев В. Использование управляемых параметров подачи электродной проволоки и колебаний ванны как динамических систем для совершенствования дуговых процессов сварки и наплавки. *Технічні науки та технології.* 2020. № 3 (21). С. 21-36.

УДК 621.81:678.06:62
DOI: 10.25140/2411-5363-2020-3(21)-37-59

Олег Пилипенко

РЕСУРСООЩАДНІ ПОЛІМЕРНІ ДЕТАЛІ ПРИВОДІВ МАШИН. ЗДОБУТКИ І ПЕРСПЕКТИВИ

Актуальність теми дослідження. *Основним джерелом зростання національного доходу повинно стати ресурсоощадження, тобто обсяг продукції повинен вироблятись без приросту матеріальних ресурсів. А це означає, що майже 80 % приросту продукції повинно бути забезпечено за рахунок економії ресурсів. З цією метою необхідно збільшити застосування прогресивних ресурсоощадних технологій, які вимагають менших витрат праці, енергії та сировини.*

Постановка проблеми. *Застосування нових безвідходних і маловідходних екологічно чистих технологій.*

Аналіз останніх досліджень і публікацій. *З аналізу літературних джерел можна зробити висновок, що вищим класом технологічного процесу є малоопераційність, маловідходність, ресурсоощадливість, коли інструмент або середовище одразу діють на всю поверхню або на весь об'єм деталі; тривалість дії інструменту або середовища на деталь у декілька десятків разів скорочується і в стільки ж разів підвищується продуктивність обладнання.*

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. *Представити основні деталі приводів машин, виготовлені за сучасними технологіями з полімерних композитів, їх застосування та перспективи розвитку.*

Мета статті. *Розглянути приклади деталей приводів машин, виготовлених із полімерних композитів за сучасними й перспективними технологіями.*

Виклад основного матеріалу. *Представлені полімерні та металополімерні зірочки, ланцюги й зубчасті колеса приводів машин, зокрема інтегрованих конструкцій, особливості їх виробництва та застосування. Показана техніко-економічна ефективність застосування деталей машин і механічних передач із полімерних композитів. Розглянуті перспективи і недоліки тривимірного друку деталей машин із полімерних композитів.*

Висновки відповідно до статті. *Дедалі більш численні приклади практичного застосування деталей машин, виготовлених за сучасними технологіями з полімерних композитів, свідчать про те, що при правильному виборі та визначенні розмірів деталей полімерні композити часто перевершують метали. А зниження споживання металів веде до скорочення видобування рудних копалин і металургійного виробництва, що, у свою чергу, сприяє вирішенню багатьох економічних, енергетичних та екологічних проблем. Застосування полімерних деталей приводів машин дає можливість отримувати переваги конструктивного, технічного, технологічного та економічного характеру.*

Ключові слова: *ресурсоощадні технології; деталі машин із полімерних композитів; техніко-економічна ефективність. Рис.: 28. Табл.: 7. Бібл.: 3.*

Вступ. На основі широкого застосування нових безвідходних і маловідходних екологічно чистих технологій буде здійснюватися, на наш погляд, докорінне технічне переобладнання машинобудівного виробництва і реконструкція підприємств.

Як конструкційні матеріали для деталей машин дедалі більшого поширення отримують композиційні матеріали (композити) на основі твердих полімерів [1; 2]. Застосування полімерних композитів замість металів призводить до зниження металомісткості та ваги, втрат від корозії, зниження енергоспоживання, вібрацій та робочих шумів, скорочення верстатного парку і виробничих площ, кардинального збільшення продуктивності та зниження собівартості продукції. Крім того, процеси виробництва деталей машин із полімерних композитів добре піддаються автоматизації. У результаті не тільки корінним чином підвищується продуктивність праці, але й отримують своє рішення питання виробництва високоякісних виробів і багатьох соціальних завдань. Людина вивільняється від безпосередньої участі в декількох або в усіх операціях із виготовлення деталей машин. При цьому якісно змінюється праця робітника: він встановлює технологічне оснащення, а далі стає оператором і спостерігає за правильністю функціонування обладнання, поповнення сировини, контролю і транспортування готової продукції.

Застосування одної тони конструкційних полімерних матеріалів заощаджує 3…5 тонн сталі. Виготовлення деталей із полімерних матеріалів дозволяє підвищити коефіцієнт використання матеріалів до 0,95 (коефіцієнт використання металу в кращому випадку становить 0,74).

Маса комплектуючих деталей безпосередньо впливає на масу машини. Тому доцільно, зокрема, у приводах машин замість металевих зубчастих коліс, зірочок, шківів, ланцюгів та інших деталей застосовувати полімерні.

© Пилипенко О. І., 2020

Одне із завдань у проблемі зниження матеріаломісткості машин полягає не тільки в максимальному підвищенні терміну служби окремих деталей, але і в досягненні рівномірного їх зношування. Вибір різних матеріалів для неоднаково навантажених деталей тієї ж машини підвищує термін її служби загалом.

Дедалі більшого значення набуває маловідходне та практично безвідходне виробництво. Другий важливий напрям в екологічному аспекті – переробка різних відходів виробництва в корисну сировину та вироби. У цьому сенсі технологія виробництва деталей машин із полімерних композитів і застосування їх у конструкціях машин належить передових безвідходних або маловідходних технологій.

Вирішення проблеми збереження ресурсів для подальшого розвитку економіки держави особливо є актуальним для багатьох галузей. До таких відноситься сільгоспмашинобудування, яке споживає близько половини металопродукції, отримуваної металургійним виробництвом. При цьому в багатьох випадках частина матеріалу втрачається при виконанні технологічних операцій різання, які вже себе «вичерпали». Нерідко готові машини мають надлишково велику масу, що в кінцевому підсумку веде до зниження родючості землі. Близько 25 % металу витрачається на запасні частини.

Економістами підраховано, що зниження собівартості виробу в результаті економії 1 % матеріалів у 4 рази більше, ніж зниження її при економії 1 % заробітної плати.

Більшість машин потребує удосконалення їхніх приводів для зниження матеріаломісткості та енергетичних витрат на розгін і гальмування ведених деталей. На привод механізмів і машин витрачається п’ята частина всього енергобалансу держави. На виготовлення деталей передач, які є однією з основних складових привода, часто витрачається не менше третини трудовитрат, необхідних для виготовлення машин і механізмів, а їх довговічність та надійність багато в чому залежить від якості передач.

Лабораторією полімерних деталей машин (ПДМ) НУ «Чернігівська політехніка» (і всіх назв нашого ЗВО, що передували сучасній назві) розроблені та впроваджені в серійне виробництво на машинобудівних підприємствах України, Росії та Білорусі нижченаведені типорозміри деталей передач зачепленням із полімерних композитів на базі поліамідів із різними наповнювачами й функціональними добавками.

1. Полімерні та металополімерні зірочки

На рис. 1 показані приводні зірочки з металевими маточинами (у другому випадку шпонковий паз ще не протягнутий), а також зірочка з можливістю регулювання положення зубчастого вінця відносно маточини [1].



Рис. 1. Зразки відлитих зірочок литвом під тиском на термопластавтоматі

На рис. 2, 3 показано дискретизацію одного з типорозмірів зірочки та інтенсивність напружень різнотовщинної зірочки з числом зубців $z = 8$ під час навантаження.

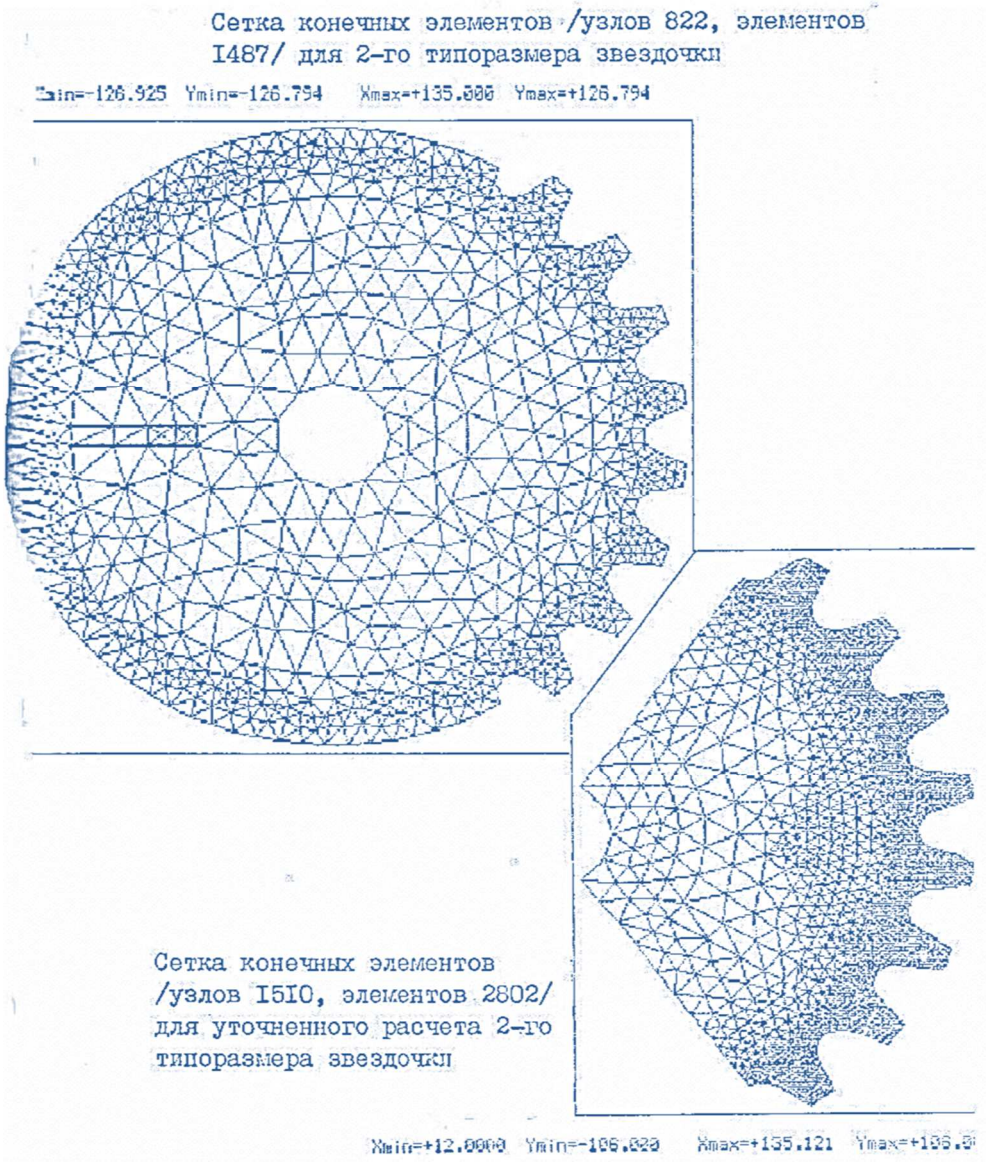


Рис. 2. Дискретизація одного з типорозмірів зірочки

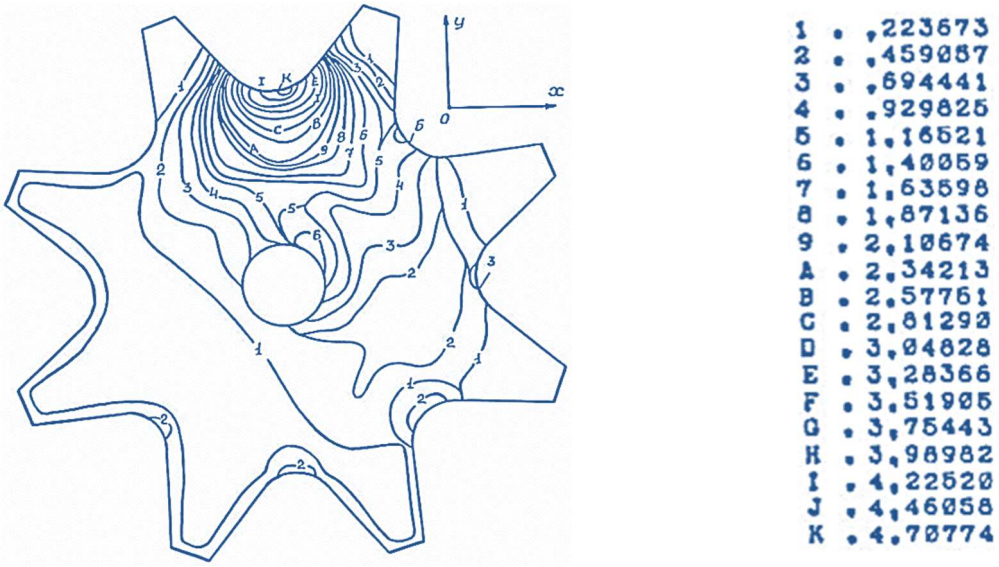


Рис. 3. Інтенсивність напружень різнотовщинної зірочки z = 8 під час навантаження

Основні конструктивні параметри полімерної зірочки, з огляду на аналіз її напружено-деформованого стану, можна визначити таким чином (рис. 4):

1) діаметр ділильного кола $d_{\partial} = \dfrac{t}{\sin\dfrac{\pi}{z}} \cong \dfrac{t}{\pi} z$, де t – крок; z – число зубців зірочки;

2) товщина зубчастого вінця $b = 0{,}85B_{вн}$, де $B_{вн}$ – відстань між пластинами внутрішньої ланки ланцюга;

3) діаметри викружок: $d_1 = 0{,}33 d_{\partial} \cong 0{,}33 \dfrac{t}{\pi} z$; $d_2 \cong 0{,}8 \dfrac{t}{\pi} z$;

4) діаметр маточини $d_{м} \cong 0{,}3 \dfrac{t}{\pi} z$;

5) довжина маточини $l \cong 3b$ (для варіанту полімерної зірочки з металевою маточиною; якщо маточина полімерна, її довжина залежатиме від крутного моменту, що передається, але не менше за *4b*);

6) товщина діафрагми $h \cong 0{,}5b$;

7) діаметр розташування отворів $d_c \cong 0{,}56 \dfrac{t}{\pi} z$;

8) діаметр отворів $d_0 \cong 0{,}19 \dfrac{t}{\pi} z$;

9) товщина обода $h_1 \cong h$.

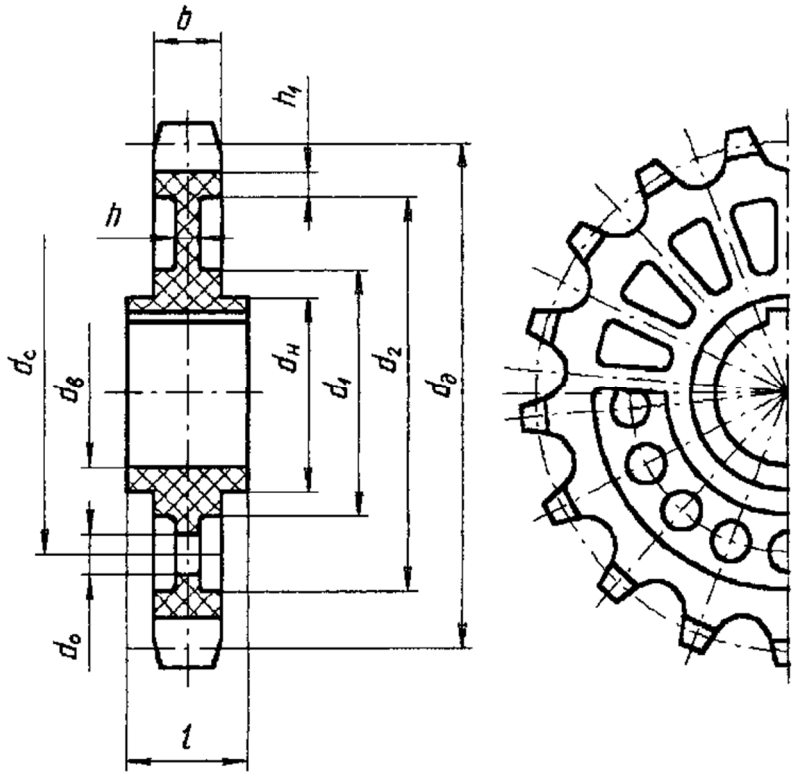


Рис. 4. Конструктивні параметри полімерної зірочки

У табл. 1 представлені типорозміри зірочок, впроваджених нами в серійне виробництво на багатьох підприємствах машинобудування.

Таблиця 1

Типорозміри зірочок, впроваджених у серійне виробництво

№	Код деталі/ форми	z	t, мм	B, мм	d, мм	l, мм	Тип
1	ЧФ-201	8	12,7	5,4	6	12	Н
2	ЧФ-33	12	12,7	3,3	16	20	П
3	ЧФ-27	13	12,7	5,4	18	34	П м/н
4	ЧФ-28	13	12,7	5,4	20	20	Пм
5	ЧФ-220	14	12,7	3,3	12\20	24	П
6	ЧФ-410	16	12,7	7,75	20	22	Н
7	ЧФ-431	16	12,7	7,75	20\28	28	Н
8	ЧФ-29	26	12,7	5,4	20	28	Пм
9	ЧФ-100	12	15,875	9,65	16	28	П м/н
10	ЧФ-1004	14	15,875	6,48	28	34	П
11	ЧФ-507	20	15,875	6,48	28	48	П
12	ЧФ-140	20	15,875	9,65	25	40	П
13	ЧФ-300	20	15,875	9,65	42*	16	Пб
14	ЧФ-1006	22	15,875	6,48	25***	34	Н
15	ЧФ-424	22	15,875	6,48	52*	16	Пб
16	ЧФ-405	25	15,875	9,65	36*	16	Пб
17	ЧФ-401	25	15,875	9,65	20	28	П м/н
18	ЧФ-37	30	15,875	9,65	36*	16	Пб
19	ЧФ-206	14	25,4	15,88	25**	25	Н

де z – число зубців; t – крок; B – відстань між внутрішніми пластинами ланцюга; d – діаметр валу; l – довжина маточини;

** – регульоване положення зубчастого вінця щодо маточини;*

*** – зірочка заодно з підшипником ковзання;*

**** – інтегрована деталь, що містить зірочку, підшипник ковзання, барабан і кришки; П – приводна зірочка зі шпонковим пазом у полімерній маточині; Н – натяжна зірочка; Пм – приводна полімерна зірочка з шпонковим пазом у металевій маточині; Пм/н – отримувані з однієї литтєвої прес-форми полімерні зірочки як у приводному виконанні з металевою маточиною, так і в натяжному виконанні; Пб – болтове кріплення полімерного вінця до маточини.*

За необхідності подальшого підвищення навантажувальної здатності полімерні зірочки армуються, крім металевої маточини, ще стальною гвинтовою замкнутою пружиною, кожний із витків якої розміщується в зубцях полімерної зірочки і має профіль, еквідистантний профілю зуба в його поперечному перерізі [1].

На рис. 5 представлені однорядні зірочки для передачі порівняно великих крутних моментів і трирядні зірочки різних конструктивних виконань [1]: натяжна полімерна, приводна металополімерна і металополімерна з болтовим кріпленням полімерного вінця до металевої маточини. Вони застосовувалися на крутильно-поверхових машинах, що входили до складу основного технологічного обладнання для виробництва хімічних волокон.

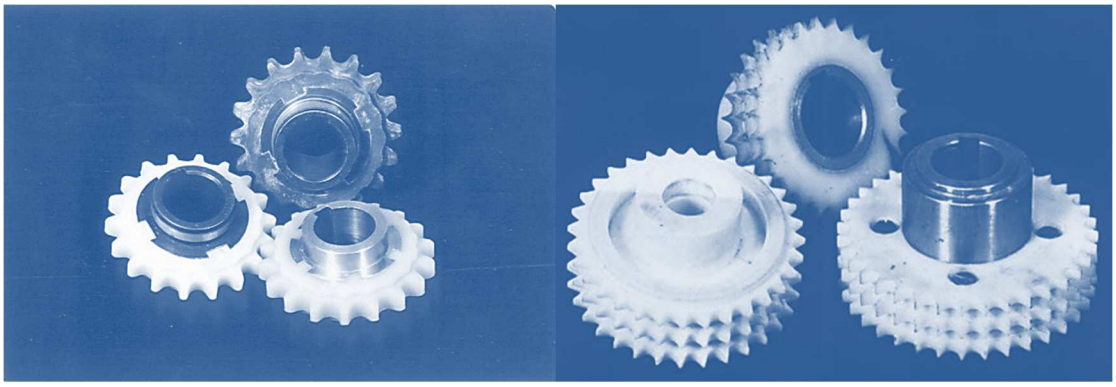
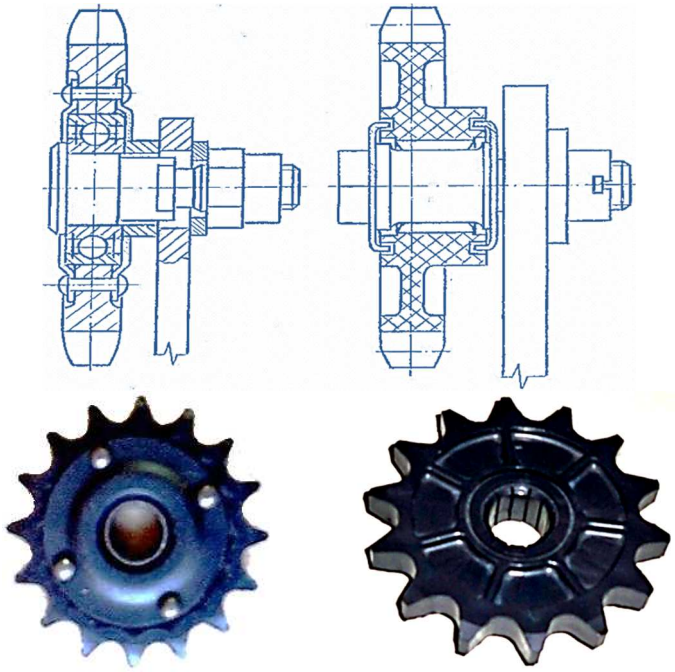


Рис. 5. Металополімерні та полімерна зірочки загального призначення

На рис. 6 представлені ескізи та фото натяжних зірочок в металевому і полімерному виконаннях у відповідних конструкціях.



а *б*

Рис. 6. Натяжна зірочка в металевому (а) і полімерному (б) виконаннях

З метою підвищення працездатності полімерних деталей машин здійснюють цілеспрямоване модифікування термопластів, що випускаються у промислових масштабах, цільовими добавками безпосередньо в процесі виготовлення деталей [1; 2].

Для економії модифікуючих добавок підшипник ковзання можна виготовляти окремо із самозмащуючогося антифрикційного матеріалу (САМ), заливаючи його як закладну деталь під час виготовлення таких деталей на термопластавтоматах [3]. Треба також відзначити, що деталі з полімерних матеріалів можна фарбувати в будь-який колір у процесі литва (рис. 7; 8).

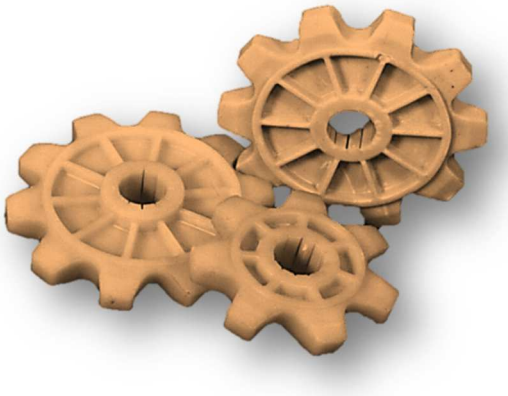


Рис. 7. Натяжні зірочки для довголанкових ланцюгів



Рис. 8. Пофарбована натяжна зірочка з підшипником ковзання з САМ

Для зниження інтенсивності зношування і впливу теплових ефектів на руйнування поверхневих і підповерхневих шарів у зоні контакту застосовані термокомпенсаційні канавки, рівномірно розподілені по периметру опори тертя ковзання. Подібні конструкції

особливо ефективні під час їх роботи за принципом зворотної пари тертя, що і має місце у випадку застосування таких підшипників у натяжних та відхиляючих зірочках (див. рис. 6, *б*). Це дає можливість збільшити частоту обертання зірочок і зносостійкість опори тертя ковзання на 25-40 % без застосування при цьому традиційного змащування. Разове заповнення канавок графітизованим консистентним мастилом дозволяє експлуатувати зірочки зі склонаповнених марок поліамідів із частотою обертання 1000 хв$^{-1}$. Зносостійкість опори тертя ковзання при цьому підвищується у 5-10 разів у порівнянні з аналогічними зірочками без канавок у підшипнику ковзання [3].

Крім вимог, що висуваються до деталей із полімерних матеріалів, що виробляються литвом під тиском, під час створення нових конструкцій елементів ланцюгових передач передбачалась можливість виконання деталей інтегрованими, тобто одна монолітна деталь, яка виготовляється за одну технологічну операцію, може містити в собі максимальне число структурно функціональних елементів.

На рис. 9 показаний приклад однієї з інтегрованих деталей, що містить у собі, крім власне зірочки, барабан і кришку кріплення деталі [1].



Рис. 9. Зірочка, інтегрована з барабаном і кришкою кріплення

Використання полімерних натяжних і відхиляючих зірочок у ланцюговому контурі дозволяє в багатьох випадках продовжити термін служби стандартних ланцюгів до нормативного терміну служби машин. Режими експлуатації полімерних зірочок за критеріями допустимого питомого тиску в опорі тертя ковзання [p] і добутку його на допустиму швидкість ковзання [V] залежно від конструктивного виконання і використаних матеріалів представлені в табл. 2 [1; 2].

Таблиця 2

Режими експлуатації полімерних зірочок

Виконання, матеріал, змащування	[p], МПа	[V], м/с	[pV], МПа·м/с
I. Натяжна зірочка, відлита заодно з підшипником ковзання з ПА-6 (10% ПЭНД)		0,3 0,6	0,12 0,3
1. Без змащування	0,4		
2. З графітизованим мастилом	0,5		
II. Зірочка у виконанні I з підшипником ковзання з ПА-6.6-1-229	1,0	–	1,0
1. Без змащування	2,0	1,25	2,5
2. З графітизованим мастилом			
III. Приводна зірочка з ПА 6-210 КС	–	–	0,1
1. Без змащування	–	–	0,25
2. З графітизованим мастилом			
IV. Приводна зірочка з ПА-6,6 КС (ПТФЭ)	–	–	2,0
1. Без змащування	–	–	4,0
2. З графітизованим мастилом			

Технологічний процес виготовлення полімерних композиційних матеріалів полягає в наступному. Функціональну добавку (наприклад, мономір ФА, поліацеталь та ін.) змішують із твердими або рідкими мастилами залежно від умов експлуатації деталі. Після перемішування суміші в її склад вводять поліетилен низького тиску у вигляді гранул або порошку й основний компонент – попередньо висушені до вмісту вологи ≤ 0,15 % гранули поліаміду. Отриману композицію завантажують у змішувач і перемішують протягом 25-30 хв. Готовий матеріал зберігають у герметичній тарі.

На рис. 10 показаний приклад вирізування формоутворюючої зубців зірочок матриці дротяним електродом на електроерозійному верстаті з ЧПК і відповідний виливок натяжної (відхиляючої) зірочки. Слід зазначити, що зазор на рисунку надто великий у порівнянні з діаметром дроту (0,2 мм) по причині наявності пружних деформацій.



Рис. 10. Вирізування формоутворюючої зубців зірочок матриці дротяним електродом і відповідний виливок натяжної (відхиляючої) зірочки

Композиційний матеріал переробляють литвом під тиском на стандартному напівавтоматичному (литтєві машини, наприклад, МЛВ-32) або автоматичному (термопластавтомат) обладнанні (рис. 11).

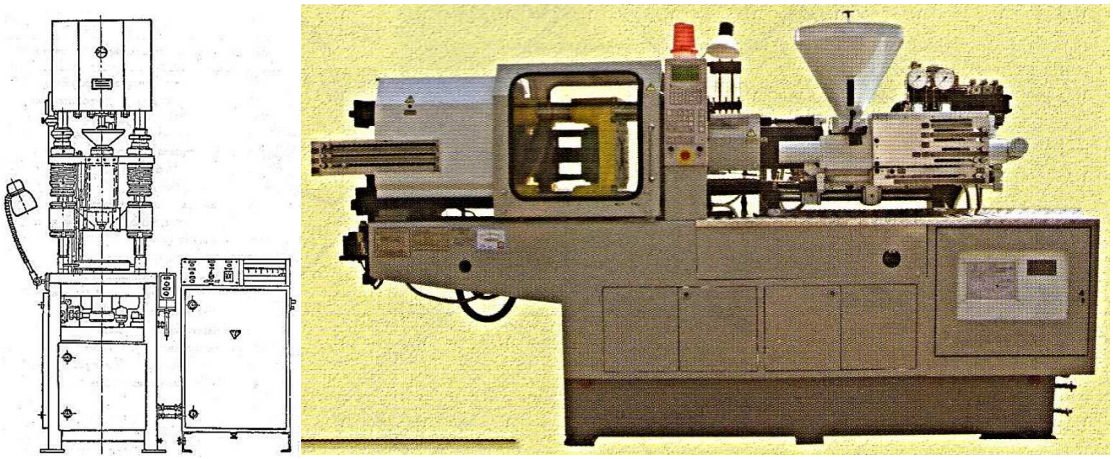


Рис. 11. Машина вертикальна литтєва МЛВ-32 (ліворуч) і термопластавтомат ДЕ 3330 Ф1(праворуч)

Температура переробки визначається маркою полімерного матеріалу, вибраного як основа: наприклад, при використанні поліаміду ПА-6 вона становить 490-520 К, а для поліаміду ПА-6.6 (анід) – 535-560 К. Питомий тиск литва в усіх випадках становить 80-120 МПа.

Один із типорозмірів натяжних зірочок (ЧФ-206 – рис. 6, табл. 1) пройшов 3-річні випробування в Українському державному центрі з випробувань та прогнозування техніки і технологій для сільськогосподарського виробництва на буряконавантажувачах СПС-4,2 безпосередньо в сезони збирання цукрового буряка в господарствах Рівненської та Дніпропетровської областей (рис. 12). На 10 зірочках вимірювались діаметри западин зубців, діаметри виступів (зовнішні діаметри), товщини зубців по діаметру ділильного кола і при вершині, діаметри підшипника ковзання, що працює на стальному пальці (рис. 6, *б*).

Зірочки були виготовлені з наступних матеріалів:
1. Склонаповнений (коротке скловолокно) поліамід ПА 6.6-КС;
2. ПА 6.6-КС з додаванням дисульфіду молібдену;
3. ПА 6.6-КС з додаванням графіту.

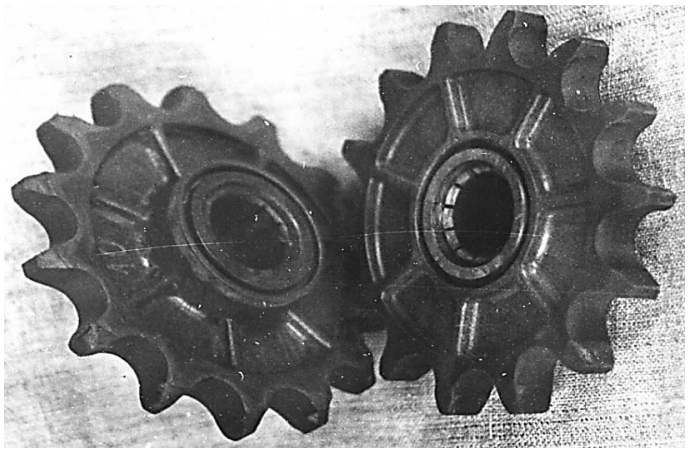


Рис. 12. Зірочки ЧФ-206 після трирічних випробувань

Порівняння інтенсивності зношування ланцюгів кроку 25,4 мм, що працюють із приводними та натяжними зірочками зі сталі 20 і склонаповненого поліаміду ПА 6-210 КС при різних умовах змащування, представлено в табл. 3 [1].

Таблиця 3

Порівняльна інтенсивність зношування ланцюгів

Матеріал зубчастого вінця зірочок	**Інтенсивність зношування ланцюгів кроку 25,4 мм $I_t \cdot 10^{-8}$**	
	без змащування	з консистентним (графітизованим) мастилом
Приводні та натяжні зі Сталі 20	7,5	6,2
Приводні зі Сталі 20, натяжні з ПА 6-210 КС	7,0	5,8
Приводні та натяжні з ПА 6-210 КС	6,7	5,6

У табл. 4 представлені експериментальні дані по допустимій навантажувальній здатності полімерних і металополімерних зірочок [1].

Таблиця 4

Допустима навантажувальна здатність полімерних і металополімерних зірочок

Матеріал	**Крок, мм**	**Число зубців**	**Навантаження, кН**	**Швидкість, м/с**
Полікапроамід (ОСТ 6-06-14-70)	15,875…25,4	14…20 20…32	0,8…1,0 1,0…1,5	6…8 8…10
	25,4…38,1	10…15 15…20	1,2…1,5 1,2…1,7	4…6 6…8
Поліамід ПА-6.8 (ГОСТ10589-73)	25,4…38,1	15…19 15….25	0,7…1,0 1,0…1,2	5…7 7…9
Поліамід ПА-6.10 (ГОСТ10589-79)	15,875…25,4	14…20 20…32	0,5…0,8 0,8…1,0	6…8 8…10
Склонаповнені поліамиди ПА6-210КС, ПА-6.6КС (ОСТ6-11-498-75), ПА-6.10ВС, КВС, КПС (ГОСТ17648-72)	15,875…25,4	14…20 20…32 10…15	1,2…1,5 1,5…1,7 1,6…1,7	6…8 8…10 5…7
	25,4…38,1	15…25	1,7…2,0	7…9

2. Полімерні та металополімерні приводні ланцюги

Практика експлуатації ланцюгових передач показує, що здебільшого корисний натяг стандартних стальних ланцюгів становить 10-20 % від їх граничного (руйнівного) навантаження. Тому має сенс виробляти не тільки зірочки, але і ланцюги з полімерних композитів. Вони хоча і не володіють таким руйнівним навантаженням, як стальні ланцюги, проте не тільки часто задовольняють найбільш розповсюдженим умовам експлуатації, але і мають переваги у вазі, споживанні енергії, швидкості, низькому рівні шумів, антикорозійній стійкості та змащуванні [1].

Як виявилося, виготовлення ланцюгових передач та їх елементів із полімерних композитів згідно з конструкціями, аналогічними стальним, у більшості випадків неможливо через відмінності в технологічних і фізико-механічних властивостях матеріалів.

Так, наприклад, з'єднання з натягом, які використовуються практично в усіх стальних роликових і втулкових ланцюгах, не можуть бути використані для складання ланцюгів із полімерних матеріалів через послаблення пресових посадок унаслідок релаксації напружень, характерної для полімерів. Або, наприклад, унаслідок розмірної замкненості конструкції роликового ланцюга неможливе збільшення небезпечних перерізів пластин у місцях провушин без значного збільшення габаритів (ширини) ланцюга, що для ланцюгів із полімерних матеріалів має велике значення внаслідок більш низьких значень міцності та жорсткості конструкційних полімерних матеріалів у порівнянні зі сталями, що традиційно використовуються з цією метою.

Для створення конструкцій елементів ланцюгових передач із необхідними технологічними й експлуатаційними характеристиками був застосований метод структурно-функціонального конструювання. Тут треба зазначити, що конструювання деталей ланцюгових передач із полімерних композитів тісно пов'язано з конструюванням прес-форм для їх литва під тиском на термопластавтоматах і технологією переробки полімерних матеріалів у вироби.

Було виготовлено відповідне обладнання для виробництва ланок ланцюгів і зірочок розроблених конструкцій литвом під тиском. Базовими матеріалами для створення полімерних композитів були поліаміди ПА-6 і ПА-6.6 виробництва Чернігівського АТ «Хімволокно». У результаті їх модифікації різними функціональними добавками були кардинально покращені їхні фізико-механічні властивості.

Ланцюги, виготовлені з полімерних композитів, основаних на поліамідах, мають розмірну точність, що відповідає точності приводних роликових ланцюгів загального призначення з невеликим руйнівним навантаженням, а ланцюги зі склонаповнених марок мають більш високу розмірну точність, що відповідає ланцюгам, при складанні яких застосовують селективний метод.

У табл. 5 представлені розроблені в лабораторії полімерних деталей машин ЧНТУ і захищені патентами [1] типорозміри полімерних і металополімерних приводних ланцюгів.

Таблиця 5

Полімерні та металополімерні приводні ланцюги

№	Код деталі / форми	*t*, мм	*B*, мм	*h*, мм	*m*	Виконання
1	ПЛ-39	12,7	7,75	10,0	1	Металеві зовнішні та полімерні внутрішні ланки
2	ПЛ-40	19,05	12,7	14,8	1.....6	Повністю полімерне
3	ПЛ-41	12,7	7,75	14,8	2	Полімерні ланки і металеві валики
4	ПЛ-42	19,05	12,7	24,2	1	Полімерні ланки і металеві валики

де t – крок ланцюга; B – відстань між внутрішніми пластинами; h – ширина ланки ланцюга; m – рядність ланцюга.

На рис. 13 зображені пружна монолітна ланка і фотографія ланцюгів ПЛ-40 (табл. 5), складених із таких ланок, в яких мають місце тільки пружні деформації. Фактично ***одна така ланка замінює 10 деталей зовнішніх і внутрішніх ланок стандартного сталь-ного ланцюга*** (рис. 13). Важливо зазначити, що з ланок, показаних на рис. 13, можна складати двох-, трьох- і багаторядні ланцюги.

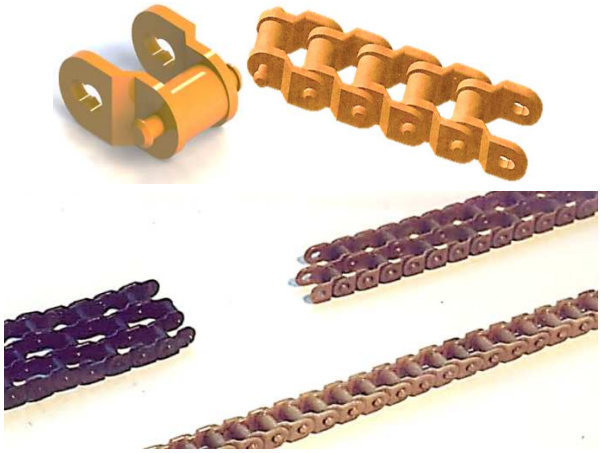


Рис. 13. Пружна монолітна ланка і ланцюги ПЛ-40, складені з таких ланок

Ланцюговий привод, оснащений ланцюгом ПЛ-40, знайшов своє застосування в установках [1], призначених для очищення поверхонь фольги від залишків мастильно-охолоджувальної рідини, що використовується заводом-виробником під час прокатування фольги і створення анодного оксидованого покриття (рис. 14). Це робиться для підвищення адгезійних властивостей поверхонь алюмінієвої фольги до клеїв у процесі виготовлення стільникових заповнювачів і утворення антикорозійного захисту стільникових конструкцій під час зберігання та експлуатації вузлів авіакосмічної техніки на їх основі.

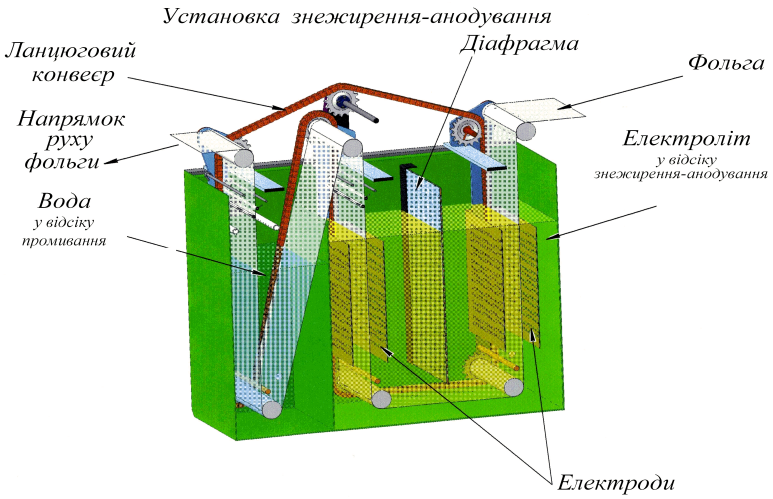


Рис. 14. Застосування полімерного ланцюгового привода

Використання в установці ланцюгового приводу, оснащеного традиційними стальними ланцюгами і зірочками, виявило низьку корозійну стійкість цих деталей в умовах агресивного середовища і підвищеної температури. Для усунення цього явища спробували застосувати гальванічні покриття, проте це не врятувало положення, тому що при цьому однаково мають місце втрати, пов’язані з витіканням струму через металевий ланцюг, і не забезпечується процес анодування фольги методом «біполярної полімеризації».

На установці, показаній на рис. 14, використовувалось 7 зірочок із полімерних композитів стандартного кроку 19,05 мм і однорядний ланцюг ПЛ-40 довжиною 10 м.

Таким чином, застосування ланцюгового приводу, оснащеного повністю полімерним ланцюгом з поліаміду ПА-6.6 або склонаповненого поліаміду ПА6-210КС і зірочками з цих же полімерних матеріалів, показало переваги вказаних полімерних деталей у порівнянні з аналогічними металевими: високу стійкість до агресивного середовища й відсутність необхідності в гальванічних покриттях; вилучення витікання струму та забезпечення процесу анодування алюмінієвої фольги методом «біполярної полімеризації»; високі механічні властивості; зниження енерговитрат на привод; відсутність шуму під час роботи; можливість роботи без змащування навіть без додавання в поліамід антифрикційних і протизносних компонентів; високу економічну ефективність. Зауважимо, що полімерний композит на основі поліаміду ПА6-210КС з додаванням незначних кількостей графіту і дисульфіду молібдену суттєво підвищує антифрикційні та протизносні властивості ланцюгів і зірочок.

На рис. 15 показаний металополімерний ланцюг ПЛ-39 (табл. 5), внутрішні ланки якого виконані з полімерного композиту у вигляді одної інтегрованої монолітної деталі, що складається з двох циліндричних елементів з отворами, з'єднаних пластинчастими елементами, і зовнішніх ланок, у ролі яких можуть служити стандартні металеві з'єднувальні ланки, тобто такий ланцюг є повністю розбірним.

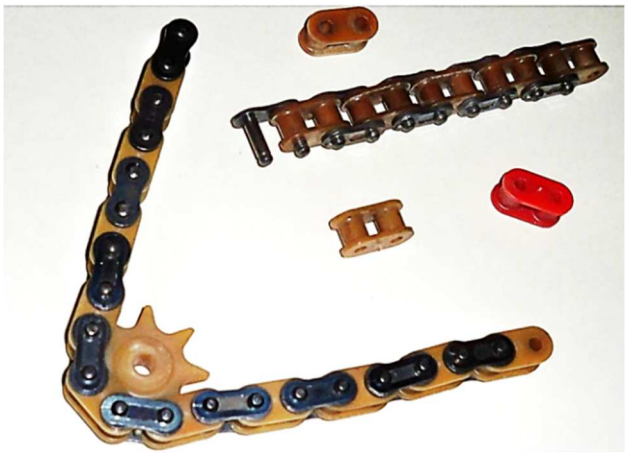


Рис. 15. Інтегровані монолітні внутрішні ланки металополімерного ланцюга

На рис. 16 представлений приводний полімерний ланцюг ПЛ-42 (табл. 5), що складається з монолітних внутрішніх ланок, зовнішніх ланок і стяжних валиків. Пластини ланок виконані прямими для можливості збільшення їх товщини без втрати здатності до їх складання в єдиний ланцюг. Це досягається введенням у ланцюг збірної зовнішньої ланки, яка фіксується в ланцюгу за допомогою стяжного валика, одночасно з'єднуючись з внутрішньою монолітною ланкою.



Рис. 16. Приводний полімерний ланцюг ПЛ-42 з ПА-6 (ліворуч) і ПА6-210КС (праворуч)

На рис. 17 показаний напружений стан ланок ланцюга ПЛ-42.

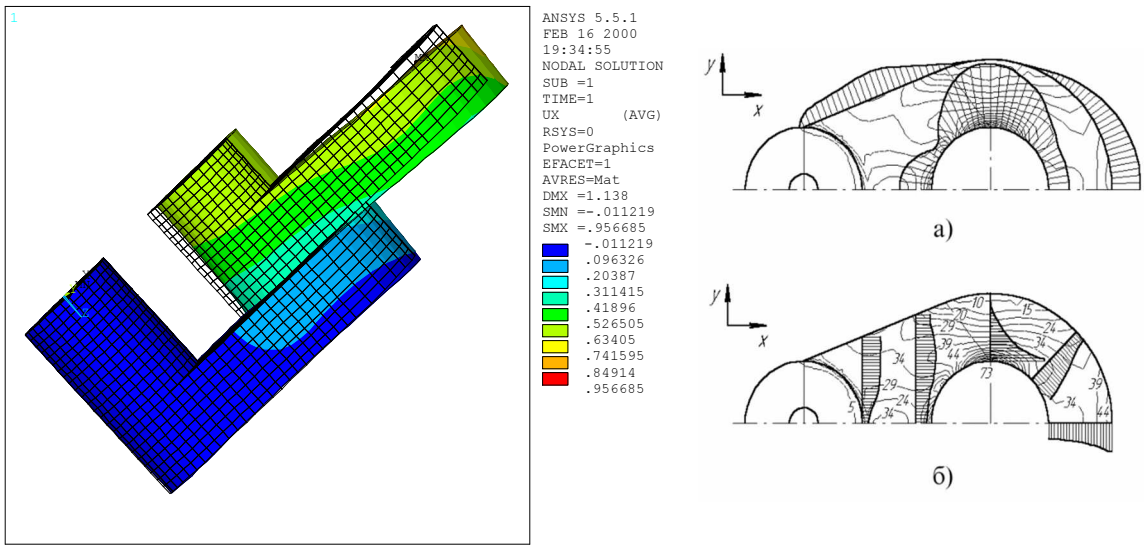
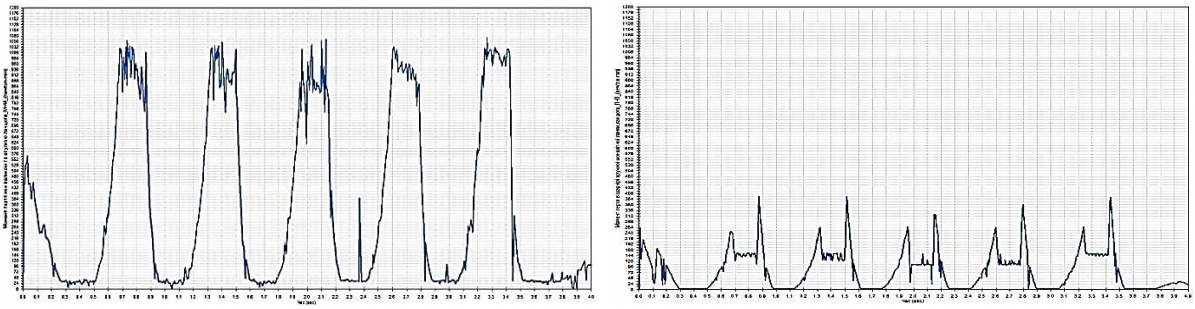


Рис. 17. Напруження в ланках ланцюга: $\sigma_{екв}$ на внутрішньому і зовнішньому контурах (а) і в тілі деталі (б)

Використання вказаних матеріалів і конструкцій деталей сприяє зниженню контактної жорсткості зачеплення, висуває менші вимоги до непаралельності валів, змінює механізм зношування елементів шарніра ланцюга, підвищуючи його зносостійкість (рис. 18). Значно знижуються динамічні навантаження в ланцюговому контурі (рис. 19), що виникають через кінематичні особливості ланцюгової передачі та співудар шарнірів ланцюга з зубцями зірочок. Зменшується вплив крайкового ефекту (перекосу) на спряжені деталі шарніра ланцюга. Суттєво знижуються питомі тиски на спряжених поверхнях контактуючих деталей і тим самим підвищується довговічність приводних роликових ланцюгів у 2-2,5 рази. Впровадження розроблених композиційних матеріалів і технологічних способів їх застосування дає можливість підвищити довговічність натяжних і відхиляючих зірочок у 5-10 разів.



а *б*

Рис. 18. Зміна моменту сил тертя в шарнірах ланцюгових передач, (Н·мм): а – у металевому виконанні (контактна пара – втулка-валик); б – у полімерному виконанні (контактна пара – шарніри двох сусідніх пружних монолітних ланок)

На рис. 19 представлені експериментальні осцилограми динамічних навантажень у ланцюговій передачі, оснащеній металевими і полімерними деталями. Як бачимо, застосування полімерних зірочок і ланцюгів призводить до кардинального зменшення динамічних навантажень.

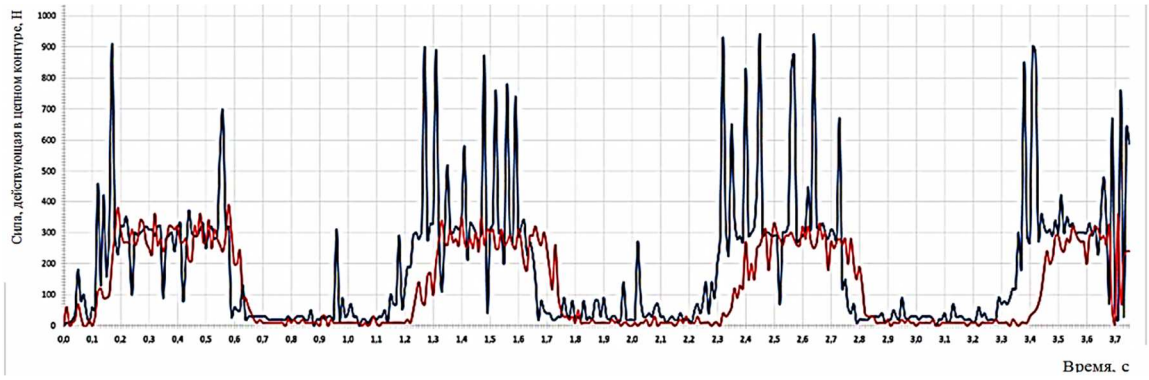


Рис. 19. Експериментальні осцилограми динамічних навантажень у ланцюговій передачі, оснащеній металевими (синій колір) і полімерними (червоний колір) деталями

Рисунок 20 ілюструє максимальні амплітуди динамічних навантажень у ланцюговій передачі, оснащеній різними сполученнями зірочок і ланцюгів, виготовлених із металевих і полімерних матеріалів [1].

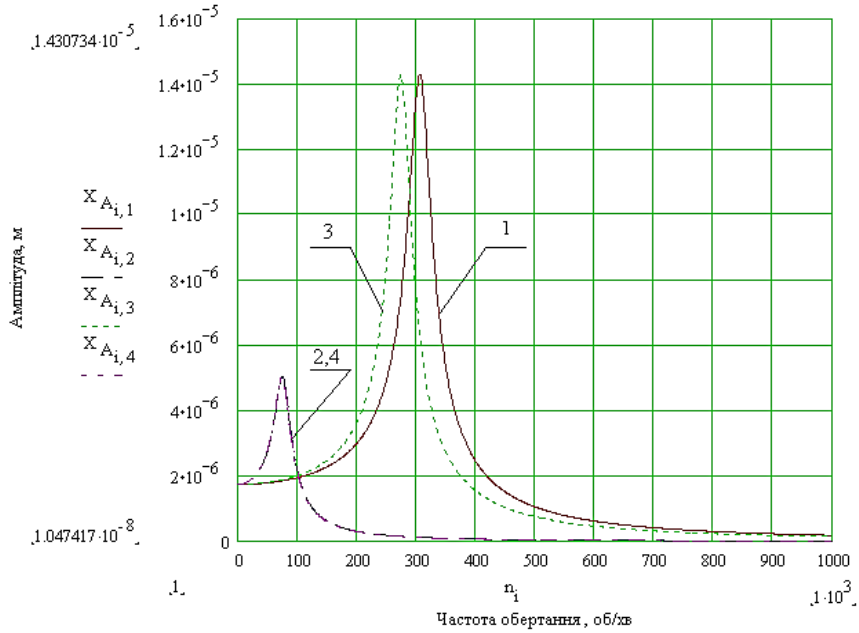


Рис. 20. Порівняння амплітуд динамічних навантажень у ланцюговій передачі, оснащеній деталями з різних матеріалів

Як бачимо, під час роботи металевого ланцюга на полімерних зірочках максимальна амплітуда динамічного навантаження менше, ніж під час роботи на металевих зірочках. При роботі полімерного ланцюга на металевих і полімерних зірочках амплітуда динамічних навантажень мінімальна і майже збігається, хоча віддати перевагу треба роботі на полімерних зірочках.

3. Полімерні та металополімерні зубчасті колеса

Для виготовлення зубчастих коліс успішно використовуються полімерні композити. Так, наприклад, дрібномодульні шестерні з політетрафторетилену, модифікованого скляними волокнами і маслами, застосовуються в годинникових механізмах, забезпечуючи точність та стабільність розмірів і не вимагаючи змащування. У ксерокопіювальній

і сканувальній техніці знайшли застосування шестерні з поліуретану, модифікованого скловолокном і політетрафторетиленом. Шестерні з поліфеніленсульфіду, модифікованого скловолокном і політетрафторетиленом, дуже стійкі до різних хімікатів та розчинів солей, знайшли застосування в шестеренних насосах для їх перекачування.

В операторі керування відкриттям-закриттям дверей ліфтів фірми OTIC застосовується черв'ячне колесо (а точніше сегмент косозубого колеса з кутом нахилу зубців 4°36') з поліаміду 6.6, модифікованого дисульфідом молібдену (рис. 21), яке працює в парі зі стальним черв'яком.



Рис. 21. Косозубий сегмент колеса, що працює в парі зі стальним черв'яком

Лабораторією полімерних деталей машин Чернігівського технологічного інституту (нині – НУ «Чернігівська політехніка») розроблені та продукуються серійно на машинобудівних підприємствах литвом під тиском 9 типорозмірів циліндричних і конічних зубчастих коліс (рис. 22, 23) з поліамідів, наповнених скловолокном та модифікованих графітом (табл. 6).

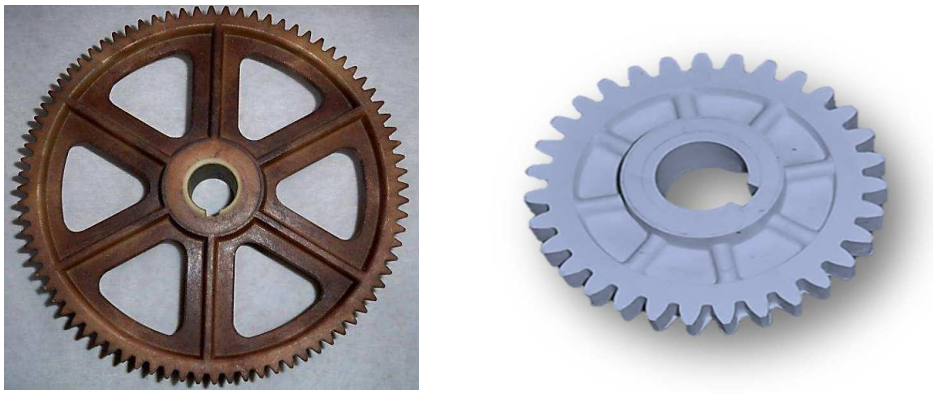


Рис. 22. Циліндричні прямозубі колеса ЧФ-600 і ЧФ-36 (табл. 6)



Рис. 23. Конічні прямозубі шестерні ЧФ-30, ЧФ-34 і зубчасте колесо ЧФ-31 (табл. 6)

Таблиця 6

Асортимент шестерень і коліс з поліамідних композицій

N пп	Номер деталі/ форми	Модуль m, мм	Число зубців z	Діаметр отвору під вал d, мм	Тип
1.	ЧФ-32	1	216	38	циліндр.
2.	ЧФ-101	3	27	25	циліндр.
3.	ЧФ-38	3	20	25*	циліндр.
4.	ЧФ-600	3	31	25	циліндр.
5.	ЧФ-36	3	80	30	циліндр.
6.	ЧФ-39	3	20	30	циліндр.
7.	ЧФ-30	3	20	25	коніч.
8.	ЧФ-31	3	40	30	коніч.
9.	ЧФ-34	3	20	20	коніч.

* *суцільно з підшипником ковзання.*

Зубчасте колесо ЧФ-32 з $m = 1$ мм і $z = 216$, шестерні ЧФ-38, ЧФ-39, ЧФ-101 присутні на рис. 24.

Один із типорозмірів конічних зубчастих коліс і прес-форма для його виробництва були спроєктовані нами для КБ «Південне» і заводу «Південмаш» [1].

4. Техніко-економічна ефективність застосування деталей машин і механічних передач із полімерних композитів

Найбільш важливими проблемами, на вирішенні яких зосереджені зусилля вчених, інженерів, економістів, є підвищення якості, надійності, економічності та продуктивності машин, обладнання та інших виробів машинобудування, зниження їх матеріаломісткості та енергоспоживання. У зв'язку з цим отримали розвиток нові підходи до розрахунку і конструювання [1; 2], пов'язані з переходом на автоматизоване оптимальне проєктування і застосування полімерних композиційних матеріалів.

Оскільки густина полімерних композиційних матеріалів у декілька разів (для склонаповнених поліамідів у 6-7 разів) нижче густини чавуну і сталі, зменшується вага полімерних деталей машин і, як наслідок, зменшуються їхні моменти інерції, енергоспоживання на розгін та гальмування, відцентрові сили, що дозволяє на 40 % підвищити частоту обертання. Водночас за рахунок в'язкопружної характеристики полімерного матеріалу знижуються динамічні та ударні навантаження в механічних приводах машин, у результаті чого довговічність їх деталей збільшується у 1,5–2 рази.

В основі сучасної технологічної цивілізації лежить прагнення виробляти дедалі більше виробів при скороченні споживання сировини й енергії. В усіх індустріально розвинених країнах національний продукт збільшується за рік у середньому на 3,5 %, виробництво ж сталі скорочується відповідно на 0,2 %. Основна причина – значний розвиток ресурсоощадних технологій, економія металу за рахунок дедалі більш широкого застосування полімерних композитів. Тенденція до скорочення виплавки сталі відображає прагнення основних індустріальних країн звільнити свою економіку від матеріало- і енергоємного, екологічно брудного виробництва.

Темпи і напрямок розвитку економіки великою мірою визначаються технологією, яку обирають інженери. Вони повинні враховувати залежність витрат і цін. В числі факторів, що стримують процес запровадження ресурсоощадних технологій, – діюча система ціноутворення (а з деякого часу і оподаткування). Крім того, у нас, як правило, неможливо добитися повного розрахунку ефективності у споживача, тобто в результаті підвищення ресурсу виробу, зниження його матеріаломісткості, маси, енергоспоживання, врахову-

ється тільки зниження собівартості виробництва деталі. Ціни на деталі та вузли орієнтовані на світовий ринок, де вони фігурують як запчастини, вартість яких у 4-5 разів вище за їхню фактичну ціну.

Суттєвою перешкодою для зростання виробництва полімерних деталей машин є інерція мислення конструкторів, вихованих на технології металів. Вони не вірять у можливості нових прогресивних матеріалів, а багато хто з конструкторів і технологів просто не знають про можливості полімерних композитів, до того ж поки що немає достатньо повного довідника конструктора-машинобудівника, який містив би всі необхідні для проєктувальника дані про ці матеріали й відповідні методи розрахунку.

Застосування полімерних композитів – якісно новий етап у розвитку машинобудування. Вони не бояться помірних навантажень і температур, корозії, з них можна отримувати матеріали практично під будь-які наперед задані умови, отримання їх не вимагає громіздких виробництв типу металургійних. Виготовлення деталей з полімерних композитів майже безвідходне і не енергоємне. Вони володіють високою ударною в'язкістю і більш стійкі до абразивного зношування при ударі, ніж сталі. З них простіше виготовляти деталі складної форми, вони настільки технологічні, що дають можливість створювати деталі, виробництво яких із металу надто дороге або взагалі неможливе. Перехід на полімерні деталі різко зменшує кількість металорізального обладнання, а отже, споживаної енергії та сировини. Вартість термопластавтомату для переробки полімерних матеріалів у вироби набагато нижче за вартість численного обладнання для металообробки, він займає набагато меншу площу, а продуктивність незмірно вище.

Скорочення тривалості виробничого циклу сприяє прискоренню обіговості оборотних коштів. Застосування полімерних композитів у машинобудуванні розширює сировинну базу промисловості, дозволяє економити коштовні кольорові та чорні метали, зумовлює асортиментні зрушення продукції, що випускається, сприяє покращенню техніко-економічних параметрів машин і обладнання, знижує фондоємність та трудомісткість виробничого процесу, скорочує терміни підготовки виробництва й освоєння нових конструкцій. Усе це створює умови для різкого підвищення продуктивності праці та зниження собівартості продукції.

Для оцінки економічної ефективності застосування полімерних матеріалів були використані конкретні дані, представлені замовниками: ВО «Дніпропетровський комбайновий завод», ВО «Томак», п/я Ж1121, Новоград-Волинський завод сільськогосподарського машинобудування, ВО «Ніжинсільмаш» (Україна), ВО «Воронежзерномаш» (Росія), ВО «Гомсільмаш» (Білорусь). Як база для порівняння була прийнята техніка (деталі машин), що замінюється.

Річний економічний ефект [1]:

$$Э = (C_1 - C_2) – E_H \cdot K_Д,$$

де C_1, C_2 – собівартість річного випуску деталей відповідно по базовому (металевому) і новому (полімерному) варіантах;

E_H – нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень, що дорівнює 0,15;

$K_Д$ – додаткові капітальні вкладення, які містять витрати на проєктування і виготовлення прес-форм, проведення НДР, руб.

Наприклад, сумарна собівартість шести типорозмірів металевих зірочок за період з листопада 1986 р. по жовтень 1987 р. становила 60 220,61 руб., а полімерних – 9153,57 руб. За рахунок збільшення випуску полімерних деталей відбулося збільшення суми економічного ефекту на 55 995,72 руб. Таким чином, сумарний економічний ефект за вказаний період склав би 107 062,76 руб., але з урахуванням витрат на НДР він становить 101 625,3 руб.

Загальна сума фактичного річного економічного ефекту ***тільки за рахунок зниження собівартості виготовлення зірочок***, підтвердженого відповідними актами, за 1987-1990 роки становила 493 009,24 руб. По Дніпропетровському комбайновому заводу, де запроваджувалась система оптимального автоматизованого проєктування багатомасових ланцюгових передач, економічний ефект становив 400 000 руб. Слід підкреслити, що під час розрахунку економічної ефективності не враховані: збільшення довговічності ланцюгів у 1,5–2 рази у споживача, зниження енергоспоживання, кількості верстатників, верстатного парку, площ цехів.

У 1986-1990 рр. лабораторією полімерних деталей машин (ПДМ) тоді Чернігівського філіалу КПІ виконувалась республіканська цільова комплексна програма РН.82.02.Ц «Матеріаломісткість» згідно з завданням 04.02 «Розробити і освоїти в промислових умовах технологічні процеси зі зниження матеріаломісткості та підвищення динамічних якостей приводів машин шляхом застосування полімерних матеріалів взамін металевих» (Постанова Ради Міністрів України № 420 від 22.11.1985 про включення програми «Матеріаломісткість» як одного з розділів державного плану економічного і соціального розвитку України на 1986-1990 рр. і Постанова Ради Міністрів України № 250 від 11.07.1986 про включення завдання 04.02 в програму «Матеріаломісткість»). Автору ставилось в обов'язок кожні три місяці прибути до під'їзду № 6 будівлі Ради Міністрів України для супроводу його в кабінет відповідального за цей напрямок чиновника, якому треба було доповісти, що зроблено за чергові 3 місяці. Зі свого боку Рада Міністрів зобов'язана була (згідно з тією ж Постановою) надати лабораторії полімерних деталей машин термопластавтомат, чого так і не було виконано.

Приведена нижче довідка з практичних результатів виконання програми на прикладі Київського ВО «ТОМАК» (табл. 7) дає уявлення про отримані техніко-економічні досягнення [1].

Таблиця 7

Показники впровадження полімерних деталей машин

Показники	**Стадія освоєння – серійне виробництво**				
	1986	1987	1988	1989	1990
План/факт, шт.	8000/ 17130	10000/ 36000	11200/ 56000	12500/ 40650	15000/ 30000
Зниження трудовитрат, разів	8,6-29,2	5,9-23,7	8,3-63,9	11,6-40,6	1,27-9,0
Зниження собівартості, разів	6,8-9,1	4,7-11,7	1,78-3,05	4,5-11,4	1,15-4,3
Економ. ефект, руб.	64238,94	101625,3	56159,0	58930,0	52056,0
Економія металу, кг	18000	27000	15000	56000	88000
Вивільнення верстатників, чол.	2	2	1	12	20

Як свідчить табл. 7, економічність не всіх деталей рівноцінна.

Загальні витрати на НДР протягом вказаних у табл. 7 років (у тому числі проєктування і виготовлення прес-форм) становили К = 598 400 руб. Загальний економічний ефект становив 333 009,24 руб. Звідси термін окупності (в середньому):

$$T = \frac{K}{Э} = \frac{598400}{333009,24} = 1,8 \text{ роки}.$$

Коефіцієнт ефективності (в середньому):

$$E = \frac{Э}{K} = \frac{333009,24}{598400} = 0,56 .$$

Порівнюючи отримані показники економічної ефективності з нормативними (для хімічної і машинобудівної галузей промисловості T = 3-5 років, E = 0,33-0,2), можна визнати, що додаткові капітальні вкладення окупаються в дуже невеликі терміни, а коефіцієнт ефективності 0,56 > 0,2, тобто дуже високий.

За вказаний період розроблено 19 типорозмірів полімерних зірочок ланцюгових передач різного призначення, 4 типорозміри ланцюгів і 9 типорозмірів циліндричних і конічних зубчастих коліс. Розроблені деталі передач з полімерних композитів виготовлялись серійно на таких підприємствах: ВО «ТОМАК» (м. Київ), п/я Ж1121, Дніпропетровський комбайновий завод, «Ніжинсільмаш», м. Ніжин, «Гомсільмаш» (м. Гомель, Білорусь), Новоград-Волинський і Білоцерківський заводи сільгоспмашинобудування, «Воронежзерномаш» (Росія). Крім того, були задоволені запити на технічну документацію від таких організацій: Приладобудівний завод (м. Буча, Київська обл.), СКТБ «Елеваторсільмаш» (м. Дніпропетровськ), Херсонський комбайновий завод, завод Мелітопольпродмаш, НВО по механізації та автоматизації Мінтяжмаша (м. Київ), п/я М-5745 (г. Бєльці, Молдова), ПО «Красный металлист» (м. Ставрополь, Росія), ПО «Минскстройматериалы» (м. Мінськ, Білорусь), «НПО им. Лавочкина» (м. Москва, Росія), Завод автоматичних ліній (м. Краснодар, Росія), Челябінський ковальсько-пресовий завод (Росія).

По 9 підприємствам, що задіяні у впровадженні результатів роботи, економічний ефект, підтверджений актами впровадження, ***тільки від зниження собівартості виробництва полімерних деталей машин*** у порівнянні з металевими становить від 30 000 до 300 000 дол. США на рік (по тодішньому курсу долара до рубля) залежно від підприємства при підвищенні надійності та довговічності приводів у 1,5-2 рази, економії близько 500 тон конструкційної сталі на рік і до 1 000 000 підшипників кочення при одночасному зниженні ваги, матеріаломісткості машин та обладнання на 25 %, скорочення верстатного парку і вивільнення виробничих кадрів та площ. Розробки захищені авторськими свідоцтвами СРСР і патентами України. Розглянуті полімерні деталі машин експонувались на міжнародних виставках у Болгарії (м. Софія та Варна), Індії (м. Делі та Калькутта), Угорщини (м. Будапешт), Чехословаччини (м. Прага), Польщі (м. Варшава), Білорусі (м. Мінськ), Югославії (м. Загреб), Німеччини (м. Берлін).

На рис. 24 представлені зразки розроблених і впроваджених полімерних деталей машин, причому від року до року, починаючи з 1990 р., вміст «пересувної виставки» (яка з'явилась уже після експонованої великої в перелічених країнах) періодично поновлювався, тобто якщо ліворуч, наряду із зірочками, присутні шестерні, шків і супутні деталі у вигляді кришок підшипників і втулок, то праворуч – в основному зірочки, зубчасті колеса й ланцюги.

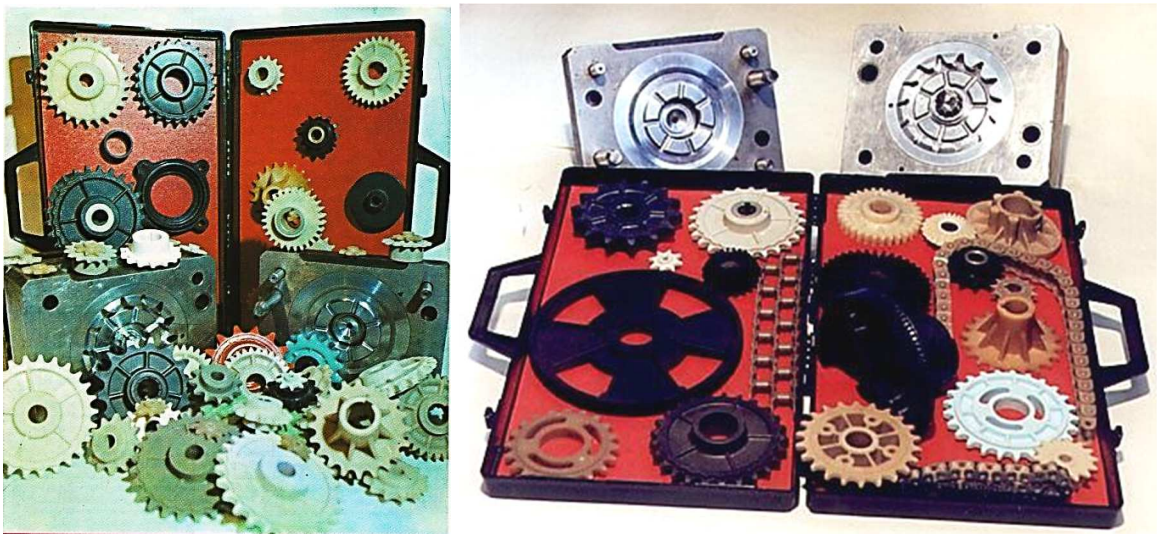


Рис. 24. Полімерні деталі машин, впроваджені на машинобудівних заводах у серійне виробництво

Розробка автоматичних литтєвих прес-форм і технологічний процес виробництва полімерних деталей машин нагороджено срібною медаллю ВДНГ СРСР (м. Москва), а автор нагороджений орденом «За заслуги» III ступеня.

У зв'язку з так званими перебудовними процесами і розпадом СРСР, освоєння полімерних деталей машин машинобудівними підприємствами було поступово згорнуто й в повному обсязі так і не було реалізовано.

На завершення треба зауважити, що за час серійного виробництва полімерних деталей машин та їх експлуатації у споживачів до цього часу яких-небудь рекламацій, пов'язаних з їх працездатністю, не поступало. Це свідчить про високу техніко-економічну ефективність заміни металевих деталей машин полімерними.

Варто зауважити ще і про те, що такі деталі з полімерних композитів не тільки значно технологічніші за металеві (увесь цикл виготовлення займає приблизно 50…60 с), але й забезпечують практично відсутність відходів виробництва завдяки вторинній переробці ливників і бракованих деталей. Більш широкі масштаби впровадження, при яких кількість застосувань розроблених методик оптимального проєктування конструкцій і технологій підніме їх на якісно новий рівень – рівень державного значення, без сумніву, дасть ще більш видатні результати.

5. Технологія тривимірного друку

В останній час набула деякого поширення технологія тривимірного друку на 3D принтерах безпосередньо з креслень в розроблених програмах. Спочатку необхідно здійснити 3D моделювання в системі SolidWorks (рис. 25) або Компас, потім зазвичай потрібно прототипування на 3D принтері з метою усунення можливих похибок процесу моделювання. Після доопрацювання запускається процес виготовлення деталі на 3D принтері пошаровим (0,08…0,2 мм) друком без тиску. Матеріалами для деталей типу шестерень, що виготовляють на 3D принтері, служать переважно поліаміди ПА-6, ПА-6.6 та їх модифікації, але у вигляді екструдованого монофіламенту, намотаного на котушку, з якої він змотується по мірі подачі в екструдер для пошарового виготовлення деталі (рис. 26).

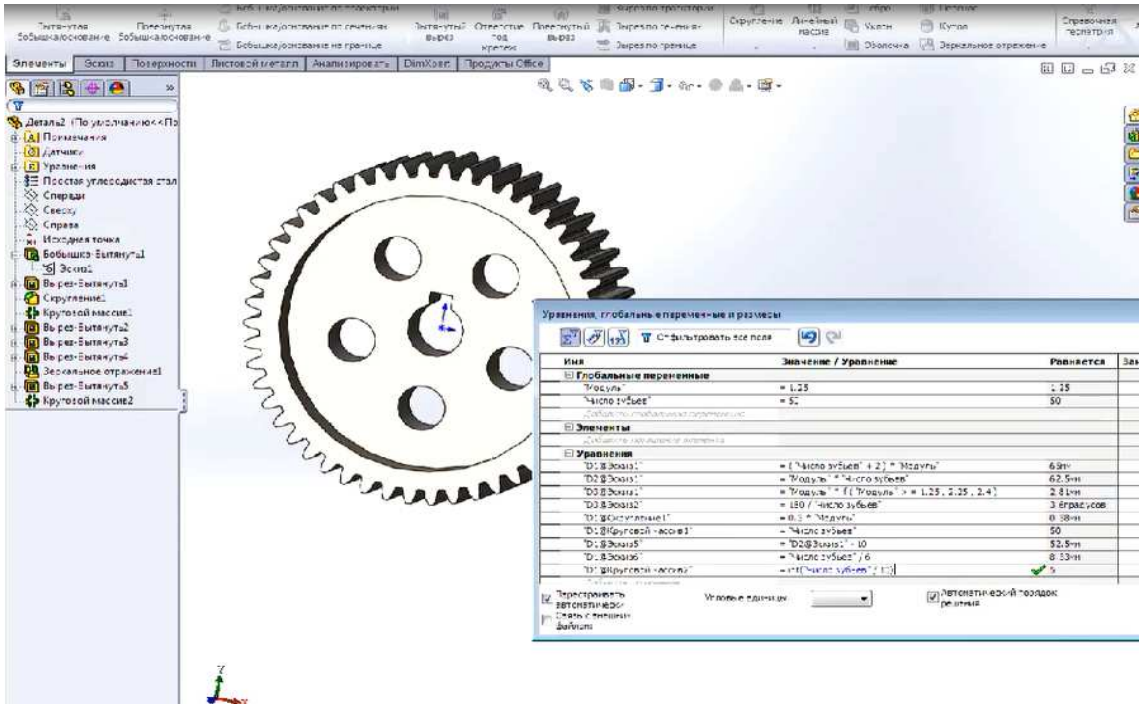


Рис.25. Моделювання шестерні

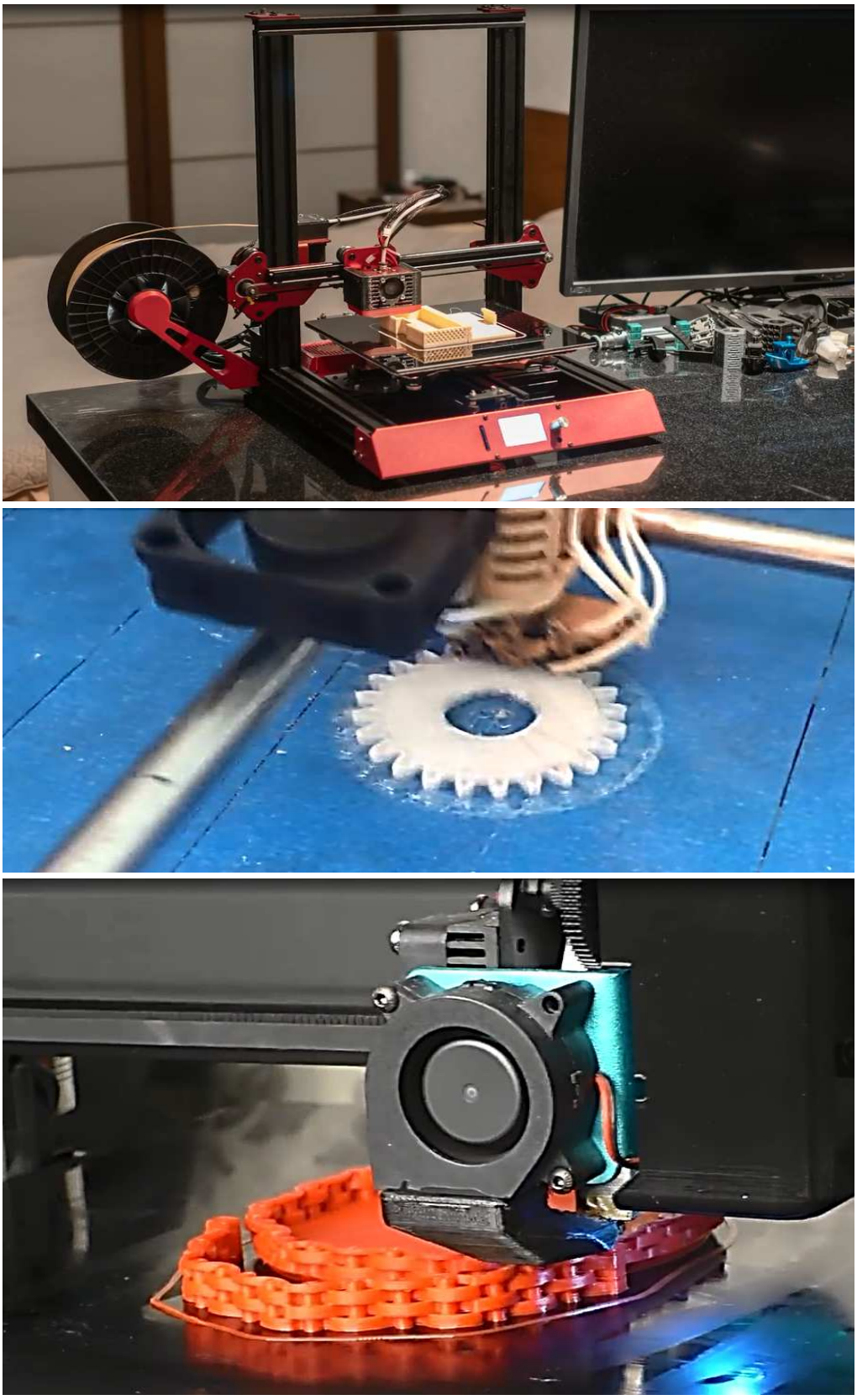


Рис. 26. 3D принтер та пошарове виготовлення деталей

Виготовлена деталь не буде такою міцною, як після прес-форми, куди полімерний матеріал подається під тиском. Крім того, вона потребує подальшої обробки з метою усунення першого шару, підтримуючих елементів, так званої «спідниці», утримуючого клею і т. п., у результаті чого деталь може деформуватись і не буде якісною (рис. 27).



Рис. 27. Клей, перший шар та «спідниця» при виготовленні шестерні

Тому виробництво деталей машин за такою технологією обмежено їх використанням переважно в обладнанні побутового призначення, офісній техніці, ручному інструменті, що не відзначаються великими навантаженнями й довговічністю, під час ремонту для тимчасової заміни деталей, які вийшли з ладу (рис. 28).



Рис. 28. Зруйнована шестерня (праворуч)
та відновлена на 3D принтері (ліворуч)

Кількість, продуктивність і собівартість виробництва таких деталей не може конкурувати з виробництвом їх у прес-формах на термопластавтоматах.

Ця технологія, хоча і є дуже багатообіцяючою, дозволяючи отримувати вироби без застосування досить коштовних прес-форм, але не може забезпечити створення точних і міцних деталей машин великими виробничими серіями, без чого застосування такої технології у машинобудуванні залишається проблематичним. Будемо сподіватись, що з подальшим розвитком науки і техніки всі зазначені недоліки технології 3D друку будуть усунені, і він знайде своє гідне місце серед найбільш продуктивних технологій виробництва деталей машин.

Висновки відповідно до статті. Дедалі більш численні приклади практичного застосування деталей машин, виготовлених за сучасними технологіями з полімерних композитів, свідчать про те, що при правильному виборі та визначенні розмірів полімерні композити часто перевершують метали. А зниження споживання металів веде до скорочення видобування рудних копалин і металургійного виробництва, що, у свою чергу, сприяє вирішенню багатьох економічних, енергетичних та екологічних проблем. Застосування полімерних деталей приводів машин дає можливість отримувати цілий ряд переваг конструктивного, технічного, технологічного та економічного характеру.

Список використаних джерел

1. Пилипенко О. И. Цепные передачи и приводы (динамический подход, новые материалы и технологии) : монография. Чернигов : Десна. 2017. 650 с.
2. Пилипенко О. И. Полимерные детали машин. Чернигов : Десна. 2020. 304 с.
3. Белый В. А., Старжинский В. Е., Щербаков С. В. Металлополимерные зубчатые передачи. Минск : Навука і тэхніка, 1981. 352 с.

References

1. Pilipenko, O. I. (2017). *Tsepnye peredachi i privody (dinamicheskii podhod, novye materialy i tehnologii) [Chain transmissions and drives (dynamic approach, new materials and technologies)]*. Desna.
2. Pilipenko, O. I. (2020). *Polimernye detali mashin [Polymer parts of mashines].* Desna.
3. Belyi, V. A., Starzhinskii, V. E., Scherbakov, S. V. (1981). *Metallopolimernye zubchatye peredachi [Metal-polymer gears].* Navuka i tehnika.

UDC 621.81:678.06:62

Oleg Pilipenko

RESOURCE-SAVING POLYMER PARTS OF MACHINE DRIVES. ACHIEVEMENTS AND PROSPECTS

Urgency of the research. *The main source of growth in national income should be resource conservation, i.e. the volume of production should be produced without an increase in material resources. This means that almost 80% of the increase in production should be provided by saving resources. To this end, it is necessary to increase the use of advanced resource-saving technologies that require less labor, energy and raw materials.*

Target Setting. *Application of new waste-free and low-waste environmentally friendly technologies.*

Actual scientific researches and issues analysis. *From the analysis of literary sources, it can be concluded that the highest class of the technological process is low-efficiency, low waste, resource saving, when a tool or environment acts immediately on the entire surface or on the entire volume of the part; the duration of the action of the tool or environment on the part is reduced by several tens of times and the productivity of the equipment is increased by the same amount.*

Uninvestigated parts of general matters defining. *To present the main parts of machine drives made of polymer composites using modern technologies, their application and development prospects.*

The research objective. *Consider examples of machine drive parts made of polymer composites using modern and advanced technologies.*

The statement of basic materials. *Presented are polymer and metal-polymer sprockets, chains and gear wheels of machine drives, including integrated structures, features of their production and use. The technical and economic efficiency of the use of machine parts and mechanical transmissions made of polymer composites is shown. The prospects and disadvantages of three-dimensional printing of machine parts made of polymer composites are considered.*

Conclusion in accordance with the article. *More and more numerous examples of the practical application of machine parts made using modern technologies from polymer composites indicate that, with the right choice and sizing of parts, polymer composites often outperform metals. A decrease in the consumption of metals leads to a decrease in the extraction of ore minerals and metallurgical production, which, in turn, contributes to the solution of many economic, energy and environmental problems. The use of polymer parts for machine drives makes it possible to obtain a number of structural, technical, technological and economic advantages.*

Keywords: *resource-saving technologies; machine parts made of polymer composites; technical and economic efficiency. Fig.: 28. Table: 7. References: 3.*

Пилипенко Олег Іванович – провідний науковий співробітник, Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки (вул. Стрілецька, 1, 14003, м. Чернігів, Україна), доктор технічних наук, професор.
Pilipenko Oleg – leading scientific coworker, State Research Institute of Tests and Certification of Armament and Military Technique (1, Shooter Str., 14003, Chernihiv, Ukraine), Doctor of Technical Sciences, Professor.
E-mail: opilip@ukr.net
ORCID: http//orcid.org/0000-0003-0590-0107

Пилипенко О. Ресурсоощадні полімерні деталі приводів машин. Здобутки і перспективи. *Технічні науки та технології.* 2020. № 3(21). С. 37-59.

УДК 004.94+532.135
DOI: 10.25140/2411-5363-2020-3(21)-60-71

Іван Кузяєв, Олександр Митрохін, Ігор Казіміров

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ОХОЛОДЖЕННЯ ПОЛІМЕРНИХ ЛИСТІВ

Актуальність теми дослідження. *Охолодження полімерних листів, як і більшість процесів переробки пластмас, належить до неізотермічних процесів, тобто необхідно розв'язувати теплову задачу. Від точного розрахунку теплового балансу дуже залежить кінцевий результат екструзійного процесу. Тому запропонована математична модель та програмний блок для її реалізації допоможуть значно покращити технологічні та економічні показники екструзійних ліній із випуску полімерних листів.*

Постановка проблеми. *Виготовленню полімерних листів присвячено багато наукових праць. При цьому такому процесу, як охолодження кінцевого продукту після екструзії приділено не багато уваги.*

Аналіз останніх досліджень і публікацій. *Створено декілька математичних моделей теплових процесів для теплоенергетичного обладнання. Наприклад: для одночерв'ячних, двочерв'ячних, черв'ячно-дискових екструдерів тощо. При цьому запропоновано різні розрахункові схеми, методи та рівняння для їх вирішення.*

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. *Математичну модель для відображення процесів охолодження полімерних листів після їх екструзії можна вважати розширенням цих досліджень.*

Постановка завдання. *Основна мета цієї статті полягає в розробці математичної моделі для аналізу температурного поля при охолодженні полімерних листів на екструзійних лініях, що дозволить оптимізувати не тільки технологічні параметри, а й конструктивні характеристики лінії.*

Виклад основного матеріалу*. При виборі граничних умов треба враховувати реальні конструктивні особливості системи охолодження полімерних листів, що одержують на екструзійних лініях. Представлено розрахункову схему та рівняння теплового балансу. Одержання математичної моделі здійснювалось за допомогою операційного методу, використовуючи інтегральне перетворення Лапласа. Розроблено програму розрахунку параметрів для конкретних умов виробництва.*

Висновки відповідно до статті. *Приведено сучасний літературний огляд теплових задач. Розроблено математичну модель для моделювання процесів охолодження полімерних листів після їх екструзії. Побудовано програмний блок на базі математичного пакета MathCAD для реалізації розробленої математичної моделі.*

Ключові слова: *екструзійна лінія; рівняння балансу; теплова енергія; математична модель; програмний блок.*
Рис.: 7 . Бібл.: 15.

Актуальність теми дослідження. Охолодження полімерних листів, як і більшість процесів із переробки пластмас, належить до неізотермічних процесів, що вимагає розв'язання теплової задачі. Від точного розрахунку теплового балансу дуже залежить кінцевий результат екструзійного процесу. Тому запропонована математична модель та програмний блок для її реалізації допоможуть значно покращити технологічні та економічні показники екструзійних ліній із випуску полімерних листів.

У цій роботі розроблено математичну модель процесів охолодження полімерних листів, одержаних на базі екструзійних ліній. При розробленні математичної моделі використано Декартові системи координат. Аналітичне рішення цієї теплової задачі знаходилось за допомогою операційного методу (методом інтегрального перетворення Лапласа). Числова реалізація отриманої математичної моделі відбувалася на базі математичного пакета MathCAD з використанням низки вбудованих у цей пакет функцій та обчислювальних блоків, при цьому розроблено відповідний програмний блок.

Постановка проблеми. Полімерні листи в більшості випадків одержують на екструзійних лініях із використанням різних типів екструдерів (одночерв'ячних, двочерв'ячних, черв'ячно-дискових тощо). Типову схему лінії для одержання полімерних листів зображено на рис. 1.

Ця лінія складається з таких основних вузлів і механізмів: екструдера *1*; екструзійної (плоскощілинної) голівки *2*; калібрувального (гладильного) каландра *3*; рольганга для охолодження листів *4*; пристрою для поздовжнього різання бічних крайок *5*; тягнучого пристрою *6*; пристрою для поперечного різання листів *7*; штабелеукладача *8*.

Як і більшість процесів переробки пластмас, охолодження полімерних листів відносяться до неізотермічних процесів. Це потребує розв'язання теплової задачі. Для цього в загальному випадку слід скористатися рівнянням теплового балансу.

© Кузяєв І. М., Митрохін О. А., Казіміров І. П., 2020



Рис. 1. Загальний вигляд лінії для виробництва одношарових листів: 1 – екструдер, 2 – екструзійна головка, 3 – калібрувальний каландр, 4 – рольганг для охолодження листів, 5 – пристрій для поздовжнього різання бічних крайок, 6 – тягнучий пристрій, 4 – пристрій для поперечного різання листів, 8 – штабелеукладач

У векторному вигляді, тобто не залежно від системи координат, в якій розглядається конкретний процес, рівняння теплового балансу можна подати таким чином [1–5]:

$$\rho \cdot C_p \cdot \frac{DT}{Dt} = -\left(\nabla \cdot \vec{q}\right) + \left(\overleftrightarrow{\sigma}; \nabla \vec{V}\right), \tag{1}$$

де C_p – коефіцієнт теплоємності матеріалу при постійному тиску; $\vec{q}$ – вектор теплового потоку; T – температура; $\nabla \vec{V}$ – градієнт вектора $\vec{V}$; DT/Dt – субстанціональна похідна від температури; $(\nabla \cdot \vec{q})$ – скалярний добуток вектора ∇ на вектор $\vec{q}$.

Другий доданок у правій частині рівняння (1) являє собою тензорний запис, що з фізичного погляду є швидкістю необерненого руху внутрішньої енергії одиниці елементарного об’єму за рахунок в’язкої дисипації. Цей доданок іноді називають функцією дисипації. Якщо значних деформацій в елементах, що розглядаються, немає, то цією величиною можна нехтувати.

Використовуючи Декартові системи координат рівняння (1), у разі нехтування функцією дисипації, набирає такий вигляд

$$\begin{aligned} \rho \cdot C_p \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial t} + V_{x_1} \cdot \frac{\partial T}{\partial x_1} + V_{x_2} \cdot \frac{\partial T}{\partial x_2} + V_{x_3} \cdot \frac{\partial T}{\partial x_3} \right) = \\ = -\left(\frac{\partial q_{x_1}}{\partial x_1} + \frac{\partial q_{x_2}}{\partial x_2} + \frac{\partial q_{x_3}}{\partial x_3} \right), \end{aligned} \tag{2}$$

де $x_i (i = 1, 2, 3)$ − координатні осі (у багатьох випадках ці осі відповідно позначаються так *x, y, z*.

Для проєкцій вектора теплового потоку q_i у більшості випадків є справедливим закон Фур’є, який можна подати у вигляді:

$$q_i = -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x_i}, \tag{3}$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності перероблюваного матеріалу.

Для розв’язання рівняння (2) з урахуванням співвідношення (3) необхідно мати по дві межові умови щодо лінійних осей координат й одну початкову умову за часом t.

Існують три основних типи межових температурних умов:

– межова умова першого роду; це коли на поверхні елемента, що розглядається, задається температура T_ξ

$$T = T_\xi \text{ при } x_i = \xi \text{ (або } x_i = 0), \tag{4}$$

де ξ − характеристичний геометричний розмір уздовж відповідної координати;

– межова умова другого роду; це коли на поверхні елемента, що розглядається, задається тепловий потік q

$$\pm \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x_i} = q_\xi \text{ при } x_i = \xi \text{ (або } x_i = 0); \tag{5}$$

– межова умова третього роду; це коли поверхня елементу має конвективний теплообмін із зовнішнім середовищем

$$\pm \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha_T \cdot (T_c - T) \text{ при } x_i = \xi \text{ (або } x_i = 0), \tag{6}$$

де T_c – температура зовнішнього середовища; α_T – коефіцієнт тепловіддачі, [Вт/(м^2·К)].

Знаки плюс і мінус відповідають направленості осі координат і вектора теплового потоку. Якщо направленості збігаються, то буде плюс, в іншому випадку – буде мінус.

Якщо припустити, що в початковий момент часу тіло мало постійну температуру T_p, то початкову умову можна записати так

$$T(x_i, t) = T_p \text{ при } t = 0. \tag{7}$$

Існує ще й межова умова четвертого роду, що відповідає теплообміну поверхні тіла з навколишнім середовищем (конвективний теплообмін тіла з рідиною) або теплообміну стикових твердих тіл.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботі [6] розроблено математичну модель для теплоенергетичного обладнання. При цьому розрахункову схему подано, як зображено на рис. 2, де мають місце такі елементи: *1* − масивне нагріте тіло; *2* − потік теплоносія; *3* − теплоізоляція.

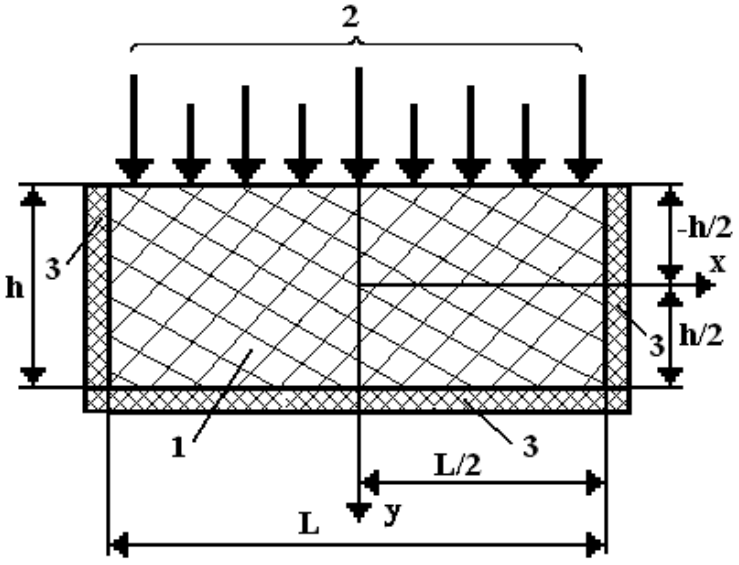


Рис. 2. Розрахункова схема для аналізу температури при взаємодії потоку теплоносія з твердим тілом: 1 − масивне нагріте тіло; 2 − потік теплоносія; 3 − теплоізоляція

Для описання процесів згідно зі схемою на рис. 2 за базове рівняння прийнято таке рівняння нестаціонарної теплопровідності:

$$\rho \cdot C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right). \tag{8}$$

При цьому прийнято такі межові умови:

– межові умови для осі *y*

$$\left.\begin{aligned} \lambda \cdot \left.\frac{\partial T}{\partial y}\right|_{y=-h/2} &= q_T, \\ \left.\frac{\partial T}{\partial y}\right|_{y=h/2} &= 0; \end{aligned}\right\} \tag{9}$$

– межові умови для осі *x*

$$\left.\begin{aligned} \left.\frac{\partial T}{\partial x}\right|_{x=0} &= 0, \\ \left.\frac{\partial T}{\partial x}\right|_{x=L/2} &= 0. \end{aligned}\right\} \tag{10}$$

Початкову умову взято таким чином:

$$T = T_n \text{ при } t = 0. \tag{11}$$

Виконуючи відповідні перегрупування з використанням інтегрального перетворення Лапласа, одержано наступне рівняння для розподілення температури в листі згідно схеми, поданої на рис. 2.

$$\begin{aligned} T(y,t) &= T_n - \frac{q_T}{\lambda \cdot \alpha_1} \times \\ &\times \left\{ \begin{aligned} &\sum_{k=0}^{\infty} \left[2 \cdot \exp\left(-\frac{\gamma 1_k{}^2}{4 \cdot t} \right) \cdot \sqrt{\frac{t}{\pi}} - \gamma 1_k \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{\gamma 1_k}{2 \cdot \sqrt{t}} \right) \right] + \\ &+ \sum_{k=0}^{\infty} \left[2 \cdot \exp\left(-\frac{\gamma 2_k{}^2}{4 \cdot t} \right) \cdot \sqrt{\frac{t}{\pi}} - \gamma 2_k \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{\gamma 2_k}{2 \cdot \sqrt{t}} \right) \right] \end{aligned} \right\}. \end{aligned} \tag{12}$$

Тепловий потік q_T від охолодного середовища може бути визначеним із такого виразу

$$q_T = \frac{G_v \cdot \rho_l \cdot C_{pl}}{S_{r\phi}} \cdot (T_s - T_1), \tag{13}$$

де ρ_l – густина; G_v – витрати; C_{pl} – теплоємність; $S_{r\phi}$ – площа поверхні, на яку подається охолоджуюче середовище; T_s, T_1 – температури відповідно поверхні твердого тіла й охолоджуючого середовища.

Крім того, у цій роботі розраховано температурне напруження, використовуючи таке рівняння

$$\sigma(y,t) = \frac{\beta \cdot E}{1-\nu} \cdot \left[\frac{1}{h} \cdot \int_{-h_2}^{h_2} T(y,t)dy + \frac{3 \cdot y}{2 \cdot h_2^3} \cdot \int_{-h_2}^{h_2} y \cdot T(y,t)dy - T(y,t) \right], \tag{14}$$

де β – коефіцієнт лінійного розширення; E – модуль пружності; ν – коефіцієнт Пуассона; $h_2 = h/2$.

У роботі [7] створено математичну модель для теплових процесів у зоні живлення одно-черв'ячного екструдера, при цьому розрахункову схему приведено до плоскої моделі, як зображено на рис. 3.

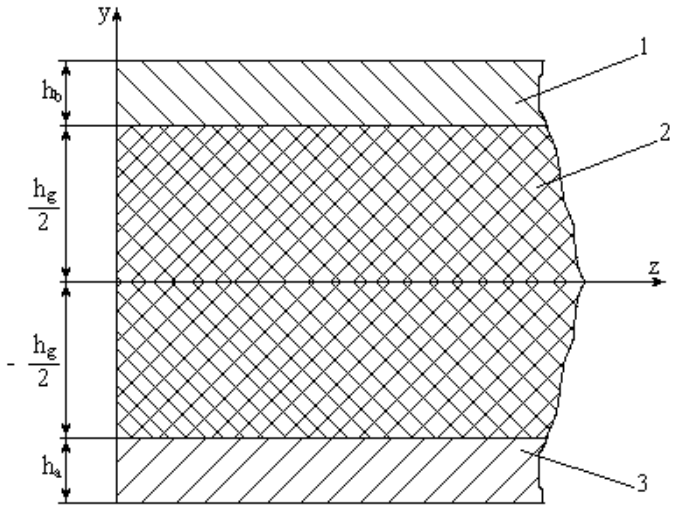


Рис. 3. Розрахункова схема для аналізу температури в зоні живлення одночерв'ячного екструдера: 1 – корпус; 2 – полімерний матеріал; 3 – осердя черв'яка

Математичну модель для моделювання температурного поля одержано з використанням інтегрального методу, при цьому на границях полімеру зі стінками каналу використано межові температурні умови другого роду.

Для визначення температури в полімерному матеріалі одержано вираз у такому вигляді:

$$T_2(z,y) = T_{2n} - \frac{1}{\lambda_s}\cdot\sqrt{\frac{a_s}{V_P}}\cdot\left(V_P\cdot f_s\cdot P_z - T_{sn}\cdot k_{1s} + T_{cs}\cdot k_{2s}\right)\cdot EX_1(z,y) -$$

$$-\frac{1}{\lambda_s}\cdot\sqrt{\frac{a_s}{V_P}}\cdot\left(V_P\cdot f_b\cdot P_z - T_{kv}\cdot k_{1b} + T_{ck}\cdot k_{2b}\right)\cdot EX_2(z,y), \qquad (15)$$

де $EX_1(z,y) = \sum_{k=0}^{\infty}\left[2\cdot\sqrt{\frac{z}{\pi}}\cdot\exp\left(-\frac{d1_k{}^2}{4\cdot z}\right) - d1_k\cdot erfc\left(\frac{d1_k}{2\cdot\sqrt{z}}\right)\right] +$

$$+\sum_{k=0}^{\infty}\left[2\cdot\sqrt{\frac{z}{\pi}}\cdot\exp\left(-\frac{d2_k{}^2}{4\cdot z}\right) - d2_k\cdot erfc\left(\frac{d2_k}{2\cdot\sqrt{z}}\right)\right];$$

$$EX_2(z,y) = \sum_{k=0}^{\infty}\left[2\cdot\sqrt{\frac{z}{\pi}}\cdot\exp\left(-\frac{d3_k{}^2}{4\cdot z}\right) - d3_k\cdot erfc\left(\frac{d3_k}{2\cdot\sqrt{z}}\right)\right] +$$

$$+\sum_{k=0}^{\infty}\left[2\cdot\sqrt{\frac{z}{\pi}}\cdot\exp\left(-\frac{d4_k{}^2}{4\cdot z}\right) - d4_k\cdot erfc\left(\frac{d4_k}{2\cdot\sqrt{z}}\right)\right]$$

$$d1_k = \sqrt{\frac{V_P}{a_s}}\cdot\left[-\left(y-\frac{h_g}{2}\right) + h_g\cdot(2\cdot k+1)\right]; d2_k = \sqrt{\frac{V_P}{a_s}}\cdot\left[\left(y-\frac{h_g}{2}\right) + h_g\cdot(2\cdot k+1)\right];$$

$$d3_k = \sqrt{\frac{V_P}{a_s}}\cdot\left[-\left(y+\frac{h_g}{2}\right) + h_g\cdot(2\cdot k+1)\right]; d4_k = \sqrt{\frac{V_P}{a_s}}\cdot\left[\left(y+\frac{h_g}{2}\right) + h_g\cdot(2\cdot k+1)\right].$$

У наведених вище рівняннях входять такі позначення: f_b, f_s − коефіцієнти тертя між полімером і відповідно корпусом й осердям; V_p − швидкість руху полімерного матеріалу; P_z − тиск, створюваний у полімері; a_s − коефіцієнт температуропровідності.

Значну кількість математичних моделей для аналізу теплових задач наведено в наступних працях [8–12].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Математичну модель для відображення процесів охолодження полімерних листів після їх екструзії можна вважати розширенням цих досліджень.

Постановка завдання. Основна мета цієї статті полягає в розробці математичної моделі для аналізу температурного поля при охолодженні полімерних листів на екструзійних лініях, що дозволить оптимізувати не тільки технологічні параметри, а й конструктивні характеристики лінії.

Виклад основного матеріалу дослідження. При моделюванні температурних полів у процесі охолодження полімерних листів використаємо прямокутні Декартові координати. При виборі граничних умов слід ураховувати реальні конструктивні особливості системи охолодження полімерних листів, що одержують на екструзійних лініях.

Верхня поверхня листа переважно охолоджується повітряним потоком або в повітряно-водяному середовищі, при цьому можна прийняти межові умови третього роду, тобто конвективний теплообмін. Нижня поверхня листа на певній, достатньо довгій частині руху листа, проходить по роликам охолоджуючого рольгангу, що дає додаткову можливість у пришвидшенні швидкості охолодження одержуваного виробу.

Розрахункову схему можна подати згідно з рис. 4, де прийнято такі позначення: T_h, T_0 – температури відповідно на верхній і нижній поверхнях листа; T_c – температура охолоджуючого середовища на верхній поверхні листа; T_p – початкова температура листа на вході в зону охолодження; V_z – швидкість руху листа.

З урахуванням певних припущень рівняння теплового балансу можна подати таким чином:

$$\rho_m \cdot C_{pm} \cdot V_z \cdot \frac{\partial T}{\partial z} = \lambda_m \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}. \tag{16}$$

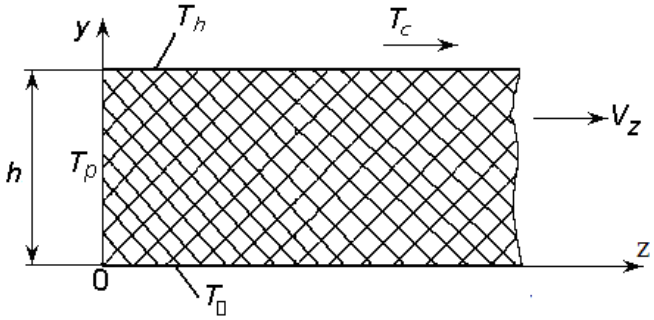


Рис. 4. Розрахункова схема для моделювання температурних процесів при охолодженні листів

Межові умови для схеми за рис. 4 запишуться таким чином (з урахування прийнятих раніше зауважень):

$$\left.\begin{aligned} \lambda_m \cdot \frac{\partial T}{\partial y} &= \alpha_c \cdot (T_c - T_h) \quad \text{при} \quad y = h; \\ T_0 &= T_p \cdot \exp\left(-\frac{z}{L} \cdot k1\right) \quad \text{при} \quad y = 0, \end{aligned}\right\}, \tag{17}$$

де α_c – коефіцієнт тепловіддачі між охолоджуючим середовищем і верхньою площиною листа; $k1$ − параметр, що характеризує швидкість охолодження нижньої поверхні листа.

Одержання математичної моделі згідно з двома останніми виразами будемо здійснювати за допомогою операційного методу, використовуючи інтегральне перетворення Лапласа за координатою *z* [13, 14]. Операторний аналог рівняння (16), тобто вираз (16) після інтегрального перетворення Лапласа, може бути поданим у такому вигляді

$$\frac{d^2T^L}{dy^2}-\frac{s}{a_z}\cdot T^L=-\frac{T_p}{a_z}, \tag{18}$$

де T^L − шукана температура в зображеннях; *s* − оператор Лапласа;

$$a_z=\frac{\lambda_m}{\rho_m\cdot C_{pm}\cdot V_z}.$$

Операторні аналоги для межових умов (17) запишуться так

$$\left.\begin{aligned}\frac{\partial T^L}{\partial y}&=\frac{\alpha_c\cdot(T_c-T_h)}{s\cdot\lambda_m} \quad \text{при} \quad y=h;\\ T_0^L&=\frac{T_p}{s+k1/L} \quad \text{при} \quad y=0.\end{aligned}\right\} \tag{19}$$

Рішення рівняння (18) має вигляд [15]:

$$T^L=\frac{T_p}{s}+C_1\cdot\exp\left(-\sqrt{\frac{s}{a_z}}\cdot y\right)+C_2\cdot\exp\left(\sqrt{\frac{s}{a_z}}\cdot y\right). \tag{20}$$

Для того щоб скористатися рівнянням (20), треба визначити сталі інтегрування C_1 і C_2, для чого необхідно безпосередньо підставити другу межову умову із (19) в (20). Для визначення обох сталих інтегрування необхідно спочатку виконати диференціювання рівняння (20) за координатою *y*, після чого підставити першу межову умову із (19).

Виконуючи вищенаведені перегрупування, в операторному вигляді рівняння (20) можна подати таким чином:

$$T^L=\frac{T_p}{s}-\frac{T_p}{s+k1/L}\cdot\frac{k1}{L}\cdot\frac{\exp\left(-K_y\cdot\sqrt{s}\right)}{s}-\frac{T_p}{s+k1/L}\cdot\frac{k1}{L}\cdot\frac{\exp\left(K_y\cdot\sqrt{s}\right)-\exp\left(-K_y\cdot\sqrt{s}\right)}{s\cdot\left[\exp\left(K_h\cdot\sqrt{s}\right)+\exp\left(-K_h\cdot\sqrt{s}\right)\right]}-$$
$$-\frac{\alpha_c\cdot(T_c-T_h)}{\lambda_m}\cdot\sqrt{\frac{a_z}{s}}\cdot\frac{\exp\left(K_y\cdot\sqrt{s}\right)-\exp\left(-K_y\cdot\sqrt{s}\right)}{s\cdot\left[\exp\left(K_h\cdot\sqrt{s}\right)+\exp\left(-K_h\cdot\sqrt{s}\right)\right]}, \tag{21}$$

де $K_y=y/\sqrt{a_z}$; $K_h=h/\sqrt{a_z}$.

Слід зазначити, що в останньому рівнянні в квадратних дужках, які знаходяться в знаменниках, у реальних умовах можна використати умову:

$$\exp\left(K_h\cdot\sqrt{s}\right)>>\exp\left(-K_h\cdot\sqrt{s}\right). \tag{22}$$

З урахуванням умови (22) вираз (21) спрощується до вигляду

$$T^L=\frac{T_p}{s}-\frac{T_p}{s+k1/L}\cdot\frac{k1}{L}\cdot\frac{\exp\left(-K_y\cdot\sqrt{s}\right)}{s}+\frac{T_p}{s+k1/L}\cdot\frac{k1}{L}\cdot\left[\frac{\exp\left(-K_{h+y}\cdot\sqrt{s}\right)}{s}-\frac{\exp\left(-K_{h-y}\cdot\sqrt{s}\right)}{s}\right]+$$
$$+\frac{\alpha_c\cdot(T_c-T_h)\cdot\sqrt{a_z}}{\lambda_m}\cdot\frac{1}{\sqrt{s}}\cdot\left[\frac{\exp\left(-K_{h+y}\cdot\sqrt{s}\right)}{s}-\frac{\exp\left(-K_{h-y}\cdot\sqrt{s}\right)}{s}\right], \tag{23}$$

де $K_{h+y}=(h+y)/\sqrt{a_z}$; $K_{h-y}=(h-y)/\sqrt{a_z}$.

На останньому етапі одержання математичної моделі слід перейти від зображення температури T^L до її оригіналу T. Для цього скористаємося такими формулами переходу й теоремами [13-14]:

$$\frac{T_p}{s} \leftrightarrow T_p;\ \frac{\exp(-K_y\cdot\sqrt{s})}{s} \leftrightarrow erfc\left(\frac{K_y}{2\cdot\sqrt{z}}\right);\ \frac{T_p}{s+k1/L}\cdot\frac{k1}{L} \leftrightarrow T_p\cdot\frac{k1}{L}\cdot\exp\left(-\frac{k1}{L}\cdot z\right);$$

$$\frac{1}{\sqrt{s}} \leftrightarrow \frac{1}{\sqrt{\pi\cdot z}};\ \frac{\exp(-K_y\cdot\sqrt{s})}{s}\cdot\frac{1}{s+k1/L} \leftrightarrow \int_0^z erfc\left(\frac{K_y}{2\cdot\sqrt{\xi}}\right)\cdot\exp\left(-\frac{k1}{L}\cdot(z-\xi)\right)d\xi.$$

Остаточно вираз для визначення температури за схемою, що відповідає рис. 4 і згідно з прийнятими межовими умовами, буде мати вигляд:

$$T(z,y) = T_p - f1(z,y) + f2(z,y) - f3(z,y). \quad (24)$$

В останньому рівнянні введено такі функції

$$f1(z,y) = T_p\cdot\frac{k1}{L}\cdot\int_0^z erfc\left(\frac{y}{2\cdot\sqrt{a_z}\cdot\sqrt{\xi}}\right)\cdot\exp\left[-\frac{k1}{L}\cdot(z-\xi)\right]d\xi;$$

$$f2(z,y) = f21(z,y) - f22(z,y);$$

$$f21(z,y) = T_p\cdot\frac{k1}{L}\cdot\int_0^z \exp\left[-\frac{k1}{L}\cdot(z-\xi)\right]\cdot erfc\left(\frac{h+y}{2\cdot\sqrt{a_z}\cdot\sqrt{\xi}}\right)d\xi;$$

$$f22(z,y) = T_p\cdot\frac{k1}{L}\cdot\int_0^z \exp\left[-\frac{k1}{L}\cdot(z-\xi)\right]\cdot erfc\left(\frac{h-y}{2\cdot\sqrt{a_z}\cdot\sqrt{\xi}}\right)d\xi;$$

$$f3(z,y) = f31(z,y) - f32(z,y);$$

$$f31(z,y) = \frac{\alpha_c\cdot(T_c - T_h(z))\cdot\sqrt{a_z}}{\lambda_m}\cdot\int_0^z erfc\left(\frac{h+y}{2\cdot\sqrt{a_z}\cdot\sqrt{\xi}}\right)\cdot\frac{1}{\sqrt{\pi\cdot\xi}}d\xi;$$

$$f32(z,y) = \frac{\alpha_c\cdot(T_c - T_h(z))\cdot\sqrt{a_z}}{\lambda_m}\cdot\int_0^z erfc\left(\frac{h-y}{2\cdot\sqrt{a_z}\cdot\sqrt{\xi}}\right)\cdot\frac{1}{\sqrt{\pi\cdot\xi}}d\xi.$$

На цьому етапі треба зазначити, що у двох останніх виразах величина $T_h(z)$, яка визначає температуру на верхній площині листа, є невідомою. Щоб одержати остаточний розрахунок, треба її визначити. Для цього, наприклад, можна скористатися функцією root, якщо користуватися пакетом MathCAD.

Побудова програмного блоку MathCAD для реалізації розробленої математичної моделі. Умови для розрахунку:

$\alpha_c := 28.6\cdot\frac{W}{m^2\cdot K}$ $T_p := 430\cdot K$ $T_0 := 300K$

$\lambda_m := 0.350\cdot\frac{W}{m\cdot K}$ $\rho_m := 810\cdot\frac{kg}{m^3}$ $C_{pm} := 2.2\cdot10^3\cdot\frac{J}{kg\cdot K}$

$h := 8mm$ $V_z := 0.02\cdot\frac{m}{s}$ $a_z := \frac{\lambda_m}{\rho_m\cdot C_{pm}\cdot V_z}$

$a_z = 9.82\times10^{-6}\,m$ $L := 800mm$ $T_c := 303K$

$k1 := 0.3$

Рішення:

$z := 1\ mm, 5\ mm .. L \quad y := 0, 1mm .. h$

$$T_0(z) := T_p \cdot \exp\left(-\frac{k1}{L} \cdot z\right)$$

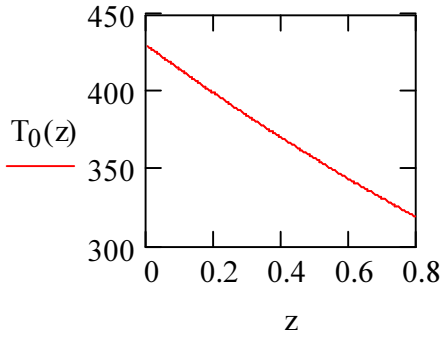


Рис. 5. Графік зміни температури на нижній площині листа

$$f1(z,y) := T_p \cdot \frac{k1}{L} \cdot \int_0^z \operatorname{erfc}\left(\frac{y}{2 \cdot \sqrt{a_z} \cdot \sqrt{\xi}}\right) \cdot \exp\left[\frac{-k1}{L} \cdot (z - \xi)\right] d\xi$$

$$f21(z,y) := T_p \cdot \frac{k1}{L} \cdot \int_0^z \exp\left[\frac{-k1}{L} \cdot (z - \xi)\right] \cdot \left(\operatorname{erfc}\left(\frac{h + y}{2 \cdot \sqrt{a_z} \cdot \sqrt{\xi}}\right)\right) d\xi$$

$$f22(z,y) := T_p \cdot \frac{k1}{L} \cdot \int_0^z \exp\left[\frac{-k1}{L} \cdot (z - \xi)\right] \cdot \left(\operatorname{erfc}\left(\frac{h - y}{2 \cdot \sqrt{a_z} \cdot \sqrt{\xi}}\right)\right) d\xi$$

$f2(z,y) := f21(z,y) - f22(z,y) \qquad f12(z,y) := T_p - f1(z,y) + f2(z,y) \quad T1_h := T_p$

$$T_h(z) := \operatorname{root}\left[-T1_h + f12(z,h) - \frac{\alpha_c \cdot (T_c - T1_h) \cdot \sqrt{a_z}}{\lambda_m} \cdot \int_0^z \left(\operatorname{erfc}\left(\frac{h + h}{2 \cdot \sqrt{a_z} \cdot \sqrt{\xi}}\right)\right) \cdot \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot \xi}} d\xi \ \ldots, T1_h \right.$$
$$\left. + \frac{\alpha_c \cdot (T_c - T1_h) \cdot \sqrt{a_z}}{\lambda_m} \cdot \int_0^z \left(\operatorname{erfc}\left(\frac{h - h}{2 \cdot \sqrt{a_z} \cdot \sqrt{\xi}}\right)\right) \cdot \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot \xi}} d\xi \right]$$

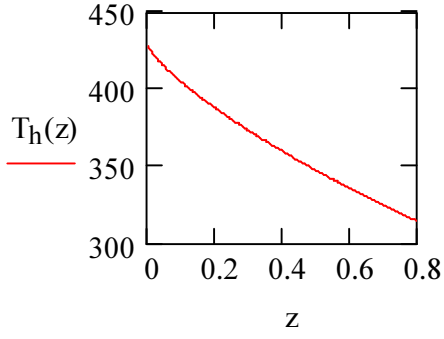


Рис. 6. Графік зміни температури на верхній площині листа

$$f31(z,y) := \frac{\alpha_c \cdot (T_c - T_h(z)) \cdot \sqrt{a_z}}{\lambda_m} \cdot \int_0^z \left(\operatorname{erfc}\left(\frac{h+y}{2 \cdot \sqrt{a_z} \cdot \sqrt{\xi}} \right) \right) \cdot \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot \xi}} \, d\xi$$

$$f32(z,y) := \frac{\alpha_c \cdot (T_c - T_h(z)) \cdot \sqrt{a_z}}{\lambda_m} \cdot \int_0^z \left(\operatorname{erfc}\left(\frac{h-y}{2 \cdot \sqrt{a_z} \cdot \sqrt{\xi}} \right) \right) \cdot \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot \xi}} \, d\xi$$

$f3(z,y) := f31(z,y) - f32(z,y)$ $f(z,y) := T_p - f1(z,y) + f2(z,y) - f3(z,y)$

$T := \text{CreateMesh}(f, 0.001, L, 0, h, 8)$

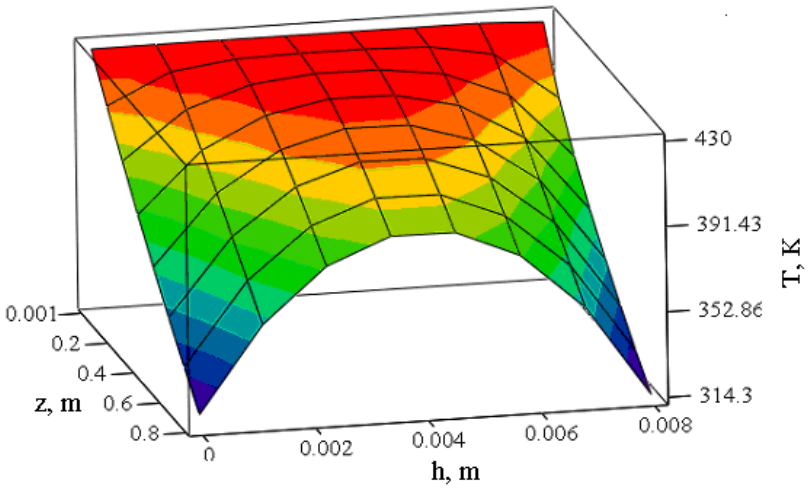


Рис. 7. Графік зміни температури по об'єму листа

Висновки відповідно до статті. Наведено сучасний літературний огляд теплових задач. Розроблено математичну модель для моделювання процесів охолодження полімерних листів після їх екструзії. Побудовано програмний блок на базі математичного пакета MathCAD для реалізації розробленої математичної моделі.

Список використаних джерел

1. Берд Р., Стьюарт В., Лайфут Е. Явления переноса. Москва : Химия, 1974. 688 с.

2. Bőhme G. Strőmungsmechanik nicht-newtonscher fluids. Stuttgart : B.G. Teubner, 1981. 280 s.

3. Леваничев В. Анализ полной реологической модели течения расплава полимера. *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. 2015. Т. 2, № 6 (74). С. 11–16.

4. Леваничев, В. Разработка модели движения расплава полимера в экструдере. *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. 2015. Т. 5, № 5 (77). С. 7–13.

5. Кузяєв І. М. Моделювання роботи та проектування екструзійних агрегатів з розробкою елементів САПР : монографія. Дніпропетровськ : ДВНЗ УДХТУ, 2008. 474 с.

6. Кузяев И. М., Казимиров И. П., Белименко С. С. Моделирование тепловых процессов в рабочих объемах химического и теплоэнергетического оборудования. *Вопросы химии и хим. технологии*. 2011. № 1. С. 160–167.

7. Кузяев И. М., Ситар В. И., Сафронова И. В. Моделирование температурного поля в системе корпус – полимерный материал – сердечник червяка для зоны питания одно червячного экструдера. *Вопросы химии и хим. технологии*. 2004. № 2. С. 198–204.

8. Sikora J. W., Sasimowski E. Influence of the length of the plasticating system on selected characteristics of an autothermal extrusion process. *Advances in Polymer Technology*. 2005. Vol. 24, № 1. P. 21–28.

9. Hwang W. R., Kwon T. H. Chaotic Volumetric Transports in a Sing le-Screw Extrusion Process. *Polymer Engineering and Science.* 2003. Vol. 43, № 4. P. 783–797.

10. Kabat O. S., Heti K. V., Kovalenko I. L., Dudka A. M. Fillers on the silica base for polymer composites of constructional purpose. *Journal of chemistry and technologies*. 2019. Vol. 27(2). P. 247–254.

11. Hong B. K., Kim H. S., Chung C. I. The flow of polymer melts through the clearance over a barrier flight in extruders. *Polymer Engineering and Science*. 2002. Vol. 42, № 3. P. 654–662.

12. Kabat O., Sukhyy, K. Antifrictional polymer composites based on aromatic polyamide and carbon black. *Chemistry & Chemical Technology*. 2018. Vol. 12 (3). Pp. 326–330.

13. Диткин В. А., Прудников А. П. Интегральные преобразования и операционное исчисление. Москва : Наука, 1974. 544 с.

14. Лаврентьев М. А., Шабат Б. В. Методы теории функций комплексного переменного. Москва : Наука, 1973. 736 с.

15. Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям / пер. с нем. под ред. С. Ф. Фомина. Москва : Наука, 1976. 576 с.

References

1. Berd, R., Stiuart, V., Laifut, E. (1974). *Yavleniia perenosa [Transfer phenomena].* Chemistry.

2. Bőhme, G. (1981). *Strőmungsmechanik nicht-newtonscher fluids*. B. G. Teubner.

3. Levanichev, V. (2015). Analiz polnoi reologicheskoi modeli techeniia rasplava polimera [Analysis of the complete rheological model of the polymer melt flow]. *Vostochno-evropeiskii zhurnal peredovykh tekhnologii – East European Journal of Advanced Technologies*, *2*(6 (74)), pp. 11–16.

4. Levanichev, V. (2015). Razrabotka modeli dvizheniia rasplava polimera v ekstrudere [Development of a model of polymer melt movement in an extruder]. *Vostochno-evropeiskii zhurnal peredovykh tekhnologii – East European Journal of Advanced Technologies*, *5*(5 (77)), pp. 7–13.

5. Kuziaev, I. M. (2008). *Modeliuvannia roboty ta proektuvannia ekstruziinykh ahrehativ z rozrobkoiu elementiv SAPR [Model robots of this design design of extrusion aggregates from the Rosroboy Element CAD]*. DVZ UDKHTU.

6. Kuziaev, I. M., Kazimirov, I. P., Belimenko, S. S. (2011). Modelirovanie teplovykh protsessov v rabochikh obemakh khimicheskogo i teploenergeticheskogo oborudovaniia [Modeling of thermal processes in the working volumes of chemical and thermal power equipment]. *Voprosy khimii i khim. Tekhnologii – Chemistry and chemical issues. Technologies*, 1, pp. 160–167.

7. Kuziaev, I. M., Sitar, V. I., Safronova, I. V. (2004). Modelirovanie temperaturnogo polia v sisteme korpus – polimernyi material – serdechnik cherviaka dlia zony pitaniia odno cherviachnogo ekstrudera [Modeling of the temperature field in the system case - polymeric material - worm core for the feeding zone of one worm extruder]. *Voprosy khimii i khim. Tekhnologii – Chemistry and chemical issues. Technologies,* 2, pp. 198–204.

8. Sikora, J. W., Sasimowski, E. (2005). Influence of the length of the plasticating system on selected characteristics of an autothermal extrusion process. *Advances in Polymer Technology*, *24*(1), pp. 21–28.

9. Hwang, W. R., Kwon, T. H. (2003). Chaotic Volumetric Transports in a Sing le-Screw Extrusion Process. *Polymer Engineering and Science, 43*(4), pp. 783–797.

10. Kabat, O. S., Heti, K. V., Kovalenko, I. L., Dudka, A. M. (2019). Fillers on the silica base for polymer composites of constructional purpose. *Journal of chemistry and technologies,* 27(2), pp. 247–254.

11. Hong, B. K., Kim, H. S., Chung, C. I. (2002). The flow of polymer melts through the clearance over a barrier flight in extruders. *Polymer Engineering and Science*, *42*(3), pp. 654–662.

12. Kabat O., Sukhyy K. (2018). Antifrictional polymer composites based on aromatic polyamide and carbon black. *Chemistry & Chemical Technology,* 12 (3), pp. 326–330.

13. Ditkin, V. A., Prudnikov, A. P. (1974). *Integralnye preobrazovaniia i operatsionnoe ischislenie [Integral transformations and operational calculus]*. Science.

14. Lavrentiev, M. A., Shabat, B. V. (1973). *Metody teorii funktsii kompleksnogo peremennogo [Methods of the theory of functions of a complex variable].* Science.

15. Kamke E. (1976). *Spravochnik po obyknovennym differentsialnym uravneniiam [Handbook of Ordinary Differential Equations]* (S. F. Fomina, Trans.). Science.

UDC 004.94+532.135

Ivan Kuzyayev, Oleksandr Mitrokhin, Igor Kazimirov

MODELING PROCESS OF CHILLING OF POLYMER SHEETS

Urgency of the research. *The chilling of polymer sheets, as most polymer processing processes, refer to non-isothermal process. This means that it is necessary to solve the heat task. Accurate calculation of the heat balance is one of the main components for achieving the result of the extrusion process. Therefore, it had been suggested mathematical model and program block for it realization help increase technological and economics index of extrusion line for production of polymer sheets.*

Target setting. *Many scientific works are devoted to the production of polymer sheets. However, the process of chilling polymer sheets received less attention.*

Actual scientific researches and issues analysis. *Several mathematical models of thermal processes for thermal power equipment have been created. For example, for single-worm, double-worm and worm-disk extruder, etc. It had been suggested different design scheme, methods and equations for its solution.*

Uninvestigated parts of general matters defining. *The mathematical model for process of chilling of polymer sheets after its extrusion can be considered as an expansion of investigations.*

Setting a task. *The main task of this article is in developing mathematical model for analysis of temperature field when chilling polymer sheets on extrusion lines, that permits to optimize technological and constructional parameters.*

The statement of basic materials. *Border conditions depend on real constructional features of chilling of polymer sheets that produced on extrusion lines. Scheme and heat balance equation were designed. The mathematical model was received with help of Laplace transform. Computer program for calculation of parameters for specific production conditions was created.*

Conclusions. *A modern literary review of thermal problems is given. A mathematical model for modeling the cooling processes of polymer sheets after their extrusion has been developed. The program block on the basis of the mathematical package MathCAD for realization of the developed mathematical model is constructed.*

Keywords: *extrusion line; balance equation; thermal energy; mathematical model; program block.*

Fig.: 7. References: 15.

Кузяєв Іван Михайлович – доктор технічних наук, професор кафедри інноваційної інженерії, Державний вищий навчальний заклад «Український Державний хіміко-технологічний університет» (просп. Гагаріна, 8, м. Дніпро, 49005, Україна).
Kuzyayev Ivan – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Innovations Engineering, State High Education Department Ukrainian State University of Chemical Technology (8 Gagarina Av., 49005 Dnipro, Ukraine).
E-mail: i.kuzyayev@ua.fm
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-7073-1197
Scopus Author ID: 37083545600

Митрохін Олександр Анатолійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри інноваційної інженерії, Державний вищий навчальний заклад «Український Державний хіміко-технологічний університет» (просп. Гагаріна, 8, м. Дніпро, 49005, Україна).
Mitrokhin Oleksandr – Candidate in Technical Sciences, Docent of the Department of Innovations Engineering, State High Education Department Ukrainian State University of Chemical Technology (8 Gagarina Av., 49005 Dnipro, Ukraine).
E-mail: A.Mitrokhin@i.ua
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-8197-1014

Казіміров Ігор Павлович – кандидат технічних наук, доцент кафедри матеріалознавства, Державний вищий навчальний заклад «Український Державний хіміко-технологічний університет» (просп. Гагаріна, 8, м. Дніпро, 49005, Україна).
Kazimirov Igor – Candidate in Technical Sciences, Docent of the Department of Materials Science, State High Education Department Ukrainian State University of Chemical Technology (8 Gagarina Av., 49005 Dnipro, Ukraine).
E-mail: 0961410151@ukr.net
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-5066-1347
Scopus Author ID: 6507341447

Кузяєв І., Митрохін О., Казіміров І. Моделювання процесів охолодження полімерних листів. *Технічні науки та технології.* 2020. № 3 (21). С. 60-71.

УДК 621.92
DOI: 10.25140/2411-5363-2020-3(21)-72-78

Володимир Кальченко, Віталій Кальченко, Сергій Цибуля, Євгеній Сахно

ВИЗНАЧЕННЯ ПОХИБКИ ПРОЦЕСІВ ШЛІФУВАННЯ ТА ШВИДКІСНОГО ФРЕЗЕРУВАННЯ З УРАХУВАННЯМ СТАТИЧНОЇ ТА ДИНАМІЧНОЇ НЕВРІВНОВАЖЕНОСТІ

Актуальність теми дослідження. *Досить часто для отримання необхідної точності виготовлення деталей, вони обробляються на круглошліфувальних, внутрішньошліфувальних, плоскошліфувальних та різьбошліфувальних верстатах. Попередньо врівноважене шліфувальне коло в процесі експлуатації втрачає врівноважений стан і набуває дисбаланс, що змінюється протягом часу. Однією з причин, що викликає зміну дисбалансу, є знос шліфувального кола, який може бути нерівномірним або рівномірним. Нерівномірний знос виникає у зв'язку з розсіюванням міцності різальної поверхні кола (у межах одного інструмента). При рівномірному зносі, зокрема й за рахунок правок кола, неврівноваженість виникає через нерівномірну щільність, відхилення розмірів, форми й розташування поверхонь.*

Постановка проблеми. *У процесі виконання шліфувальних робіт необхідно враховувати те, що шпиндель шліфувального верстата внаслідок зносу шліфувального кола, піддатливості опор, згинальної жорсткості переходить у неврівноважений стан, що впливає на точність і якість механічної обробки деталей. Тому виникає проблема визначення похибок положення ротора динамічної системи з урахуванням статичної та динамічної неврівноваженості, складових сил різання та пружних зусиль, що виникають в опорах шпиндельного вузла.*

Аналіз останніх досліджень і публікацій. *У роботі були розглянуті останні публікації з цієї теми, які представлено у відкритому доступі, включаючи мережу Інтернет.*

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. *Відомі дослідження точності процесу шліфування важкооброблюваних деталей не враховують вплив статичної, динамічної та моментної неврівноваженості технологічної системи шліфувального верстата. Однак у процесі оцінювання точності положення шпинделя в просторових координатах та точності виготовлення заданої деталі в математичній моделі процесу механічної обробки необхідно враховувати перераховані фактори. Тому дані дослідження дають можливість конструктору підвищити точність проєктування металорізальних верстатів шліфувальної групи при обробці деталей, які мають конструктивну неврівноваженість.*

Постановка завдання. *Метою цієї наукової роботи є моделювання положення шпинделя шліфувальних та фрезерних верстатів з урахуванням інерційних зусиль, які виникають унаслідок статичної та динамічної неврівноваженості роторного вузла, що обумовлює точність і якість процесу механічної обробки.*

Виклад основного матеріалу. *Стан врівноваженості шпиндельного вузла, відбалансованого заводом-виготовлювачем, при обробці деталей на металорізальних верстатах безупинно змінюється. При шліфуванні дисбаланс виникає внаслідок зношування і неоднорідної структури змінної інструментальної головки шліфувального круга. У процесі обробки деталі, яка обертається, він зумовлений неврівноваженою заготовкою. Для компенсації режимної зміни дисбалансу і з метою підвищення якості обробки, особливо на фінішних операціях, без зниження нормативних режимів різання на шпиндель верстата встановлюють коригувальні маси, диски з приводом їх від гідростатичної або гідродинамічної опор.*

Висновки відповідно до статті. *У результаті проведених досліджень у роботі отримано математичну модель положення шпинделя шліфувального верстата з урахуванням складових статичної та динамічної неврівноваженості ротора, яка виникає внаслідок похибок технологічної системи верстата та зносу шліфувального кола. Використовуючи цю модель можна проводити розрахунок похибок механічної обробки, що виникають при різанні. Також це дослідження дозволяє уточнити вплив похибок процесу шліфування на якість обробки деталей, що дає можливість оптимізувати режими різання і, відповідно, підвищити ефективність процесу шліфування. Ця методика також може використовуватися для високошвидкісного фрезерування, яке є альтернативою шліфуванню.*

Ключові слова: *фрезерування; шліфування; похибки; точність.*
Рис.: 1. Бібл.: 7.

Актуальність теми. Досить часто для отримання необхідної точності виготовлення деталей вони обробляються на круглошліфувальних, внутрішньошліфувальних, плоскошліфувальних та різьбошліфувальних верстатах. Попередньо врівноважене шліфувальне коло в процесі експлуатації втрачає врівноважений стан і набуває дисбаланс, що змінюється протягом часу. Однією з причин, що викликає зміну дисбалансу, є знос шліфувального кола, який може бути нерівномірним або рівномірним. Нерівномірний знос виникає у зв'язку з розсіюванням міцності різальної поверхні кола (в межах одного інструмента). При рівномірному зносі, зокрема й за рахунок правок кола, неврівноваженість виникає через нерівномірну щільність, відхилення розмірів, форми і розташування поверхонь. Крім того, зміна неврівноваженості може бути викликана накопиченням у колі відходів шліфування та мастильно-охолоджувальної рідини у зв'язку з неоднорідною пористістю шліфувального кола. Тому процеси балансування доцільно використовувати на верстатах шліфувальної групи та верстатах для швидкісного фрезерування.

© Кальченко В. В., Кальченко В. В., Цибуля С. Д., Сахно Є. Ю., 2020

Постановка проблеми. У процесі виконання шліфувальних робіт необхідно враховувати те, що шпиндель шліфувального верстата внаслідок зносу шліфувального кола, піддатливості опор, згинальної жорсткості переходить у неврівноважений стан, що впливає на точність і якість механічної обробки деталей. Тому виникає проблема визначення похибок положення ротора динамічної системи з урахуванням статичної та динамічної неврівноваженості, складових сил різання та пружних зусиль, що виникають в опорах шпиндельного вузла.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботі [1] розглянуто сучасні технології виготовлення високоточних деталей різними методами. Наведено математичну теорію процесів фінішної механічної обробки матеріалів та сформульовано практичні рекомендації щодо впровадження прогресивних технологій механічної обробки у виробництво. У роботах [2; 3] проведено дослідження круглого шліфування переривчастими кругами й показано підвищений рівень оброблення поверхонь кочення в порівнянні з традиційними методами шліфування. Також визначено поведінку шпинделя шліфувальної бабки при зміні жорсткості опор для розробки автоматичної системи стабілізації величини зазору в гідростатичних підшипниках для підвищення сталості процесу шліфування. У [4] розглянуто метод виділення з часового ряду періодичної складової вібраційного процесу. Представлено експериментальний прототип системи вимірювання вібрацій для промислового шліфувального обладнання. У роботі [5] розглянуто проблему повного балансування багаточашкового абразивного інструменту, розроблено графічну модель процесу балансування.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Відомі дослідження точності процесу шліфування важкооброблюваних деталей не враховують вплив статичної, динамічної та моментної неврівноваженості технологічної системи шліфувального верстата. Однак у процесі оцінювання точності положення шпинделя в просторових координатах та точності виготовлення заданої деталі в математичній моделі процесу механічної обробки необхідно враховувати перераховані фактори. Тому дані дослідження дають можливість конструктору підвищити точність проєктування металорізальних верстатів шліфувальної групи при обробці деталей, які мають конструктивну неврівноваженість.

Постановка завдання. Метою цієї наукової роботи є моделювання положення шпинделів шліфувальних та фрезерних верстатів з урахуванням інерційних зусиль, які виникають унаслідок статичної та динамічної неврівноваженості роторних вузлів верстатів, що зумовлює точність і якість процесу механічної обробки.

Виклад основного матеріалу. Стан врівноваженості шпиндельного вузла, відбалансованого заводом-виготовлювачем, при обробці деталей на металорізальних верстатах безупинно змінюється. При шліфуванні дисбаланс виникає внаслідок зношування і неоднорідної структури шліфувального круга. У процесі обробки деталі, яка обертається, він зумовлений неврівноваженою заготовкою. Для компенсації режимної зміни дисбалансу й з метою підвищення якості обробки, особливо на фінішних операціях, без зниження нормативних режимів різання на шпиндель верстата встановлюють коригувальні (неврівноважені) маси (КМ), [6] диски з приводом їх від гідростатичної або гідродинамічної опор. По окружності дисків з боку торцевих поверхонь просвердлено Z_0 отворів, осі яких паралельні осі шпинделя. Частина отворів заповнена свинцем ($Z \leq Z_0/2$) для додання КМ певного значення дисбалансу, що компенсує вектор дисбалансів неврівноваженого шпинделя.

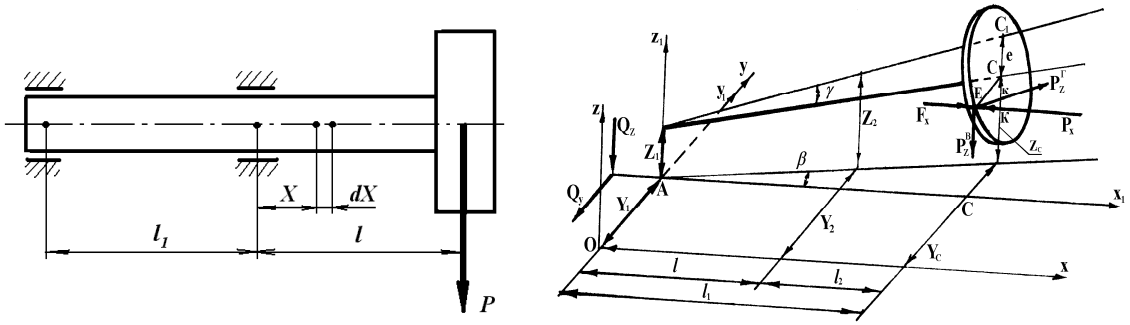
Відцентрова сила, створювана одним свинцевим циліндром при обертанні шпинделя з кутовою швидкістю ω , дорівнює:

$$F = M_{сц}\,\omega^2\,R_{сц},$$

де $M_{сц}$ – маса свинцевого циліндра; $R_{сц}$ – радіус розміщення свинцевого циліндра.

При цьому умова компенсації неврівноваженості оброблюваної заготовки отримана в роботі [6].

При обробці складних і важкооброблюваних деталей похибки обробки, що виникають унаслідок деформацій технологічної системи та її елементів є домінуючими в сумарній похибці обробки. Для їхнього визначення проведемо динамічні дослідження системи шпиндель – неврівноважена шліфувальна головка (рис. 1).



а *б*

Рис. 1. До визначення похибки обробки: а – схема для визначення приведеної маси системи; б – розрахункова схема динамічної системи

Згинальний момент у перетині шпинделя (рис. 1, *а*) визначається за формулою:

$$M_x = P(l-x) + \frac{q(l-x)^2}{2}, \tag{1}$$

де P – вага шліфувальної головки; q – погонна вага шпинделя.

Рівняння пружної лінії ротора має вигляд:

$$EJ\frac{d^2y}{dx^2} = P(l-x) + \frac{Q(l-x)^2}{2}. \tag{2}$$

Інтегруємо двічі отримаємо:

$$Y_x = \frac{P(l-x)^3}{6EJ} + \frac{q(l-x)^4}{24EJ} + C + D. \tag{3}$$

Постійні інтегрування C и D знайдемо з початкових умов при $x = 0; y = 0$:

$$x=0;\ y=0;\ \frac{dy}{dx} = 0.$$

Після підстановки в [3] одержимо:

$$Y_x = \frac{1}{2EJ}\left[\frac{P(l-x)^3}{3} + \frac{q(l-x)^4}{12} + l^2\left(P + \frac{ql}{2}\right)x - \frac{l^3}{3}\left(P + \frac{ql}{4}\right)\right]. \tag{4}$$

При $x = l, Y_x = Y_l$:

$$Y_l = \frac{1}{2EJ}\left[l^3\left(P + \frac{ql}{3}\right) - \frac{l^3}{3}\left(P + \frac{ql}{4}\right)\right].$$

Виражаючи Y_x через Y_l, знайдемо:

$$Y_x = \frac{\left\{lx^3\left(P + \frac{ql}{2}\right) - \left[\frac{x^3}{3}(P + ql) - \frac{qx^4}{12}\right]\right\}Y}{\left(\frac{2}{3}P + \frac{ql}{4}\right)l^3}. \tag{5}$$

Закон збереження енергії для динамічної системи має вигляд:

$$T = \int_0^e dT_x + \frac{m_1 \dot{Y}_e^2}{2}, \tag{6}$$

де $dT_x = \frac{q\,dx}{2q}\dot{Y}^2$ – кінетична енергія елемента механічної системи довжиною *dx*; $T = \frac{(m_n + m_1)}{2}\dot{Y}_e^2$ – кінетична енергія всієї системи.

Заміняючи *T* і dT_x їхніми значеннями, й інтегруючи вираз (6), одержимо формулу для визначення наведеної маси ротора:

$$m_n = \frac{(0{,}104P^2 + 0{,}08Pql + 0{,}016q^2l^2)P}{(0{,}6 + \frac{1}{4}ql^2)}, \tag{7}$$

де $q = Q/l$ – погонна вага шпинделя; *P* – вага шліфувальної головки; *l* – довжина консолі.

Далі в роботі досліджуємо змушені коливання системи з урахуванням статичної і динамічної неврівноваженості, а також з урахуванням дії складових сил різання P_x і P_z, а також пружних сил F_x мастильного матеріалу підшипника (осьова складова сили різання не враховується через її мале значення).

Представимо механічну систему в тримірному просторі. Система має осьову інерцію, обертається з кутовою швидкістю ω на двох опорах *A* і *B* з коефіцієнтами жорсткості C_1 і C_2 (рис. 1, *б*). Виберемо нерухому систему координат *OXYZ* так, щоб її початок збігався з лівою опорою в положенні рівноваги. Додамо системі мале переміщення, тоді координати опори *A* будуть Y_1; Z_1, а координати опори *B* – Y_2; Z_2. При цьому, динамічні похибки обробки визначаються як різниці координат кінцевого і початкового положення системи $Y_2 - Y_1$; $Z_2 - Z_1$.

Головний центральний осьовий момент інерції визначається за формулою:

$$I_0 = \frac{1}{2}M_1R^2 + \frac{1}{2}M_2R_1^2, \tag{8}$$

де M_1 і M_2 – маса шпинделя і шліфувальної головки, відповідно; *R* і R_1 – радіус шпинделя і шліфувальної головки.

Момент інерції відносно осі, перпендикулярної до осі обертання ротора, з урахуванням зміщення шпинделя під дією технологічного дисбалансу буде:

$$J = M_1\left(\frac{R^2}{4} + \frac{l^2}{3}\right) + M_2\left(\frac{R_1^2}{4} + \frac{l_1^2}{3}\right). \tag{9}$$

Кут між проєкцією осі шпинделя на площину *xy* і віссю *x* позначимо β, а між віссю шпинделя і її проєкцією на площину *xy* позначимо γ. Запишемо координати центра ваги С за формулами:

$$Y_c = -Y_1\frac{l_2}{l} + Y_2\frac{l_1}{l}; Z_c = -Z_1\frac{l_2}{l_1} + Z_2\frac{l_1}{l}.$$

Тоді кути β і γ будуть виражатися через координати $\beta = \frac{Y_2 - Y_1}{l}; \gamma = \frac{Z_2 - Z_1}{l}$.

Ексцентриситет валу позначимо через *e*. Головна вісь інерції утворює з віссю обертання кут δ. Площина, у якій лежить кут δ, і площина *xy* утворить кут ($\omega t - \varepsilon$), де ε – кут відхилення осі від вертикалі, ω – кутова швидкість обертання головки. З урахуванням вищезазначеного, центри інерції Y_c і Z_c, відхилені на величину *e*, визначаються з виразу:

$$\left.\begin{aligned} Y_c &= -Y - e\cos\omega t \\ Z_c &= Z + e\sin\omega t \end{aligned}\right\}. \tag{10}$$

З урахуванням координат центрів ваги X_c і Z_c, кутів β і γ, а також піддатливості опор ротора в поперечному напрямку, рівняння набудуть такого вигляду:

$$\left.\begin{aligned} &M(\ddot{y}_2 l_1 - l_2\ddot{y}_1) + c_1 l y_1 + c_2 l y_2 = Mel\omega^2\cos\omega t + P_z^{\Gamma} l - Q_y l; \\ &M(\ddot{z}_2 l_1 - l_2\ddot{z}_1) + c_1 l z_1 + c_2 l z_2 = Mel\omega^2\sin\omega t + P_z^{B} l - Q_z l; \\ &J_0\omega(\ddot{y}_2 - \ddot{y}_1) - J(\ddot{z}_2 - \ddot{z}_1) + c_1 l_1 l z_1 + c_2 l_2 l z_2 = (J_0 - J)\times \\ &\times\omega^2 l\delta\sin(\omega t - \varepsilon) + (P_x - F_x)Hl - Q_z l_5 l; \\ &J_0\omega(\ddot{z}_2 - \ddot{z}_1) - J(\ddot{y}_2 - \ddot{y}_1) + c_1 l_1 l y_1 + c_2 l_2 l y_2 = (J - J_0)\times \\ &\times\omega^2 l\delta\cos(\omega t - \varepsilon) + (F_x - P_x)Ll - Q_y l_5 l. \end{aligned}\right\}, \tag{11}$$

де Q_y та Q_z – параметри ваги шпинделя по координатах y і z.

Розв'язання рівняння (11) проводиться відомими математичними методами на ПК. Результати дозволяють одержати дійсну картину переміщень, швидкості і прискорення ротора в перехідному режимі з урахуванням уточнених координат елементів шпинделя. Змінюючи координати Y і Z можна управляти рівнем вібрації роторної системи і, в остаточному підсумку, параметрами якості механічної обробки.

Передові фірми Schiess koop та Junker (Німеччина) для обробки складних поверхонь з криволінійним профелем використовують верстати з ЧПК, в яких процеси фрезерування та шліфування виконуються послідовно на одному верстаті.

Фірма Schiess koop вперше запропонувала фрезерування та шліфування кулачків розподільчих валів двигунів внутрішнього згорання з послідовним вводом інструментальних бабок у зону обробки.

Інструментальна поверхня, як поверхня обертання дискових інструментів шліфувального кола і фрези описується одним рівнянням, матричний вираз якого наведено в роботі [7]. Це дає змогу при фрезеруванні та шліфуванні описувати еквідістанти одним рівнянням, з урахуванням діаметра інструмента, що спрощує процеси управління шліфуванням та фрезеруванням.

Конструкція верстатів Schiess koop включає дві роторні системи: система «шпиндель-деталь» та «шпиндель-інструмент (фреза, шліфувальний круг)». Для забезпечення постійного зняття припуску за координатою обробки деталь повинна обертатися зі змінною частотою обертання, що викликає динамічні навантаження на технологічну систему. Для зменшення похибок «технологічної спадковості» процесу фрезерування на процес шліфування застосовують швидкісне фрезерування з використанням інструменту, оснащеного неперетоточуваними пластинками з надтвердих матеріалів (ельборових та металокерамічних).

Висновки відповідно до статті. У результаті проведених досліджень у роботі отримано математичну модель положення шпинделя шліфувального верстата з врахуванням складових статичної та динамічної неврівноваженості ротора, яка виникає внаслідок похибок технологічної системи верстата та зносу шліфувального кола. Використовуючи цю модель можливо проводити розрахунок похибок механічної обробки, що виникають при різанні. Також це дослідження дозволяє уточнити вплив похибок процесу шліфування на якість обробки деталей, що дає можливість оптимізувати режими різання і, відповідно, підвищити ефективність процесу шліфування.

За запропонованою моделлю можна оптимізувати параметри роторних систем «шпиндель-деталь» та «шпиндель-інструмент» та технологічної системи загалом. Вона дає змогу розрахувати частоту обертання деталі та режими фрезерування і шліфування за координатою обробки, яка забезпечує необхідну точність та якість оброблюваної поверхні.

Список використаних джерел

1. Новіков Ф. В., Рябенков І. О. Теоретичні основи механічної обробки високоточних деталей : монографія. Харків : ХНЕУ, 2013. 352 с.
2. Лук'янчук Ю. А., Ткачук А. А. Дослідження геометричних показників якості процесу круглого переривчастого шліфування. *Перспективні технології та прилади*. 2013. Вип. 3. С. 64–71.
3. Федотьєва Л. П. Визначення поведінки пружної системи шпиндельних опор шліфувальної бабки. *Вестник ДГМА*. 2014. № 1 (13Е). С. 85–91.
4. Зайцев Є. О., Сидорчук В. Є., Сидорчук І. В., Шпилька А. М. Застосування методу найменших квадратів при обробці моніторингової інформації шліфувального обладнання. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2015. № 4(53. С. 175–179.
5. Озимок Ю. І., Рудницький Р. Б. Методика балансування багаточашкового абразивного інструменту. *Науковий вісник УДЛУ*. 2014. № 14.4. С. 104–108.
6. Струтинський В. Б., Сахно Є. Ю Дослідження системи шпиндельного вузла з неврівноваженою заготовкою. *Промислова гідравліка і пневматика*. 2006. № 1. С. 59–63.
7. Сіра Н. М. Підвищення ефективності шліфування циліндричних, ступінчастих та криволінійних поверхонь обертання зі схрещеними осями круга та деталі : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / ЧНТУ. Чернігів, 2017. 23 с.

References

1. Novikov, F. V., Ryabenkov, I. O. (2013). *Teoretychni osnovy mekhanichnoi obrobky vysokotochnykh detalei [Theoretical bases of mechanical processing of high-precision parts]*. KHNEU.
2. Lucyanchuk, Yu. A., Tkachuk, A. A. (2013). Doslidzhennia heometrychnykh pokaznykiv yakosti protsesu kruhloho pereryvchastoho shlifuvannia [Study of geometric parameters of the quality of the round intermittent grinding process]. *Perspektyvni tekhnolohii ta prylady – Advanced technologies and devices*, 3, pp. 64–71.
3. Fedoteva, L. P. (2014). Vyznachennia povedinky pruzhnoi systemy shpyndelnykh opor shlifuvalnoi babky [Determining the behavior of the elastic system of spindle supports of the grinding headstock]. *Vestnyk DHMA – Bulletin of the DGMA*, 1 (13E), pp. 85–91.
4. Zaitsev, E. A., Sidorchuk, V. E., Sidorchuk, I. V., Shpilka, A. M. (2015). Zastosuvannia metodu naimenshykh kvadrativ pry obrobtsi monitorynhovoi informatsii shlifuvalnoho obladnannia [Application of the least squares method for processing monitoring information of grinding equipment]. *Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh – Measuring and computer technology in technological processes*, 4(53), pp. 175–179.
5. Ozimok, Yu. I., Rudnitsky, R. B. (2014). Metodyka balansuvannia bahatochashkovoho abrazyvnoho instrumentu [Method of balancing a multi-cup abrasive tool]. *Naukovyi visnyk UDLU – Scientific Bulletin of UDLU*, 14.4, pp. 104–108.
6. Strutinsky, V. B., Sakhno, E. Yu. (2006). Doslidzhennia systemy shpyndelnoho vuzla z nevrivnovazhenoiu zahotovkoiu [Investigation of the spindle assembly system with an unbalanced billet]. *Promyslova hidravlika i pnevmatyka – Industrial hydraulics and pneumatics*, 1, pp. 59–63.
7. Sira, N. M. *Pidvischennya efektivnosti shlifuvannya tsilindrichnih, stupinchastih ta krivoliniynih poverhon obertannya zi shreschenimi osyami kruga ta detali [Improving the grinding efficiency of cylindrical, stepped and curved surfaces of rotation with crossed axes of a circle and a part]* [Abstract PhD dissertation; ChNTU, Ukraine].

UDC 621.92

Volodymyr Kalchenko, Vitalii Kalchenko, Sergii Tsybulia, Evgeny Sakhno

DETERMINATION OF ERROR OF GRINDING AND SPEED MILLING PROCESSES TAKING INTO ACCOUNT STATIC AND DYNAMIC IMBALANCE

Urgency of the research. *Quite often, in order to obtain the necessary precision in the manufacture of parts, they are processed on circular grinding, internal grinding, surface grinding and thread grinding machines. The previously balanced grinding wheel loses its balanced state during operation and acquires an imbalance that changes over time. One of the reasons for the change in imbalance is the wear of the grinding wheel, which can be uneven or even. Uneven wear occurs due to the variation in the strength of the cutting surface of the wheel (within the same tool). With uniform wear, including due to wheel edits, imbalance occurs due to uneven density, deviations in size, shape and location of surfaces.*

Target setting. *In the process of performing grinding work, it is necessary to take into account the fact that the spindle of the grinding machine, due to wear of the grinding wheel, pliability of supports, bending stiffness, goes into an unbalanced state, which affects the accuracy and quality of machining of parts. Therefore, the problem arises of determining the errors of the rotor position of the dynamic system, taking into account the static and dynamic imbalance, the components of the cutting forces and elastic forces arising in the supports of the spindle assembly.*

Analysis of recent research and publications. *The work considered the latest publications on this topic, which are presented in the public domain, including the Internet.*

Uninvestig atedpart sof general matters defining. *Known studies of the accuracy of the grinding process of difficult-to-work parts do not take into account the influence of the static, dynamic and moment imbalance of the technological system of the grinding machine. However, when assessing the accuracy of the position of the spindle in spatial coordinates and the accuracy of manufacturing a given part in the mathematical model of the machining process, the listed factors must be taken into account. Therefore, these studies enable the designer to improve the design accuracy of metal-cutting machine tools of the grinding group when processing parts that have a structural imbalance.*

The research objective. *The purpose of this research is to model the position of the spindle of grinding and milling machines, taking into account the inertial forces that arise due to static and dynamic imbalance of the rotor assembly, which determines the accuracy and quality of the machining process.*

The statement of basic materials. *The balanced state of the spindle assembly equilibratedby the manufacturer, and when processing parts on metal-cutting machines, it continuously changes. When grinding, imbalance occurs due to wear and the uneven structure of the grinding wheel. In the process of machining a rotating part, it is due to an unbalanced workpiece. To compensate for the mode change in imbalance and in order to improve the quality of processing, especially at finishing operations, without reducing the standard cutting conditions, correction masses, discs driven by hydrostatic or hydrodynamic supports are installed on the machine spindle.*

Conclusions. *As a result, of the research carried out in the work, a mathematical model of the position of the spindle of a grinding machine was obtained, taking into account the components of the static and dynamic imbalance of the rotor, which arises due to errors in the technological system of the machine and wear of the grinding wheel. Using this model, it is possible to calculate the machining errors that occur during cutting. In addition, this study makes it possible to clarify the effect of errors in the grinding process on the quality of processing parts, which makes it possible to optimize cutting conditions, and accordingly increase the efficiency of the grinding process. This technique can also be used for high-speed milling, which is an alternative to grinding.*

Keywords*: milling; grinding, error, accuracy.*
Fig.: 1. References: 7.

Кальченко Володимир Віталійович – доктор технічних наук, професор, проректор з науково-педагогічної роботи, Національний університет «Чернігівська політехніка» (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).
Kalchenko Volodymyr – Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-rector in scientific and pedagogical work, Chernihiv Polytechnic National University (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).
E-mail: vvkalchenko74@gmail.com
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-9072-2976
ResearcherID: G-6752-2014

Кальченко Віталій Іванович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування, Національний університет «Чернігівська політехніка» (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).
Kalchenko Vitalii – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head road Transport Industry and Mechanical Engineering Department, Chernihiv Polytechnic National University (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).
E-mail: kalchenkovi@ukr.net
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-9850-7875
ResearcherID: G-9477-2014

Цибуля Сергій Дмитрович – доктор технічних наук, професор, директор навчально-наукового інституту механічної інженерії, технологій та транспорту, Національний університет «Чернігівська політехніка» (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).
Tsybulia Sergii – Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of the Educational and Scientific Institute of Mechanical Engineering, Technology and Transport, Chernihiv Polytechnic National University (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).
E-mail: stcibula@gmail.com
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-7843-6061
Researcher ID: H-1391-2016

Сахно Євгеній Юрійович – доктор технічних наук, професор кафедри геодезії, картографії та землеустрою, Національний університет «Чернігівська політехніка» (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).
Sakhno Evgeny – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Geodesy, Cartography and Land Management, Chernihiv Polytechnic National University (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).
E-mail: evsakhno@ukr.net
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-9789-7242
ResearcherID: M-3987-2016

Кальченко В., Кальченко В., Цибуля С., Сахно Є. Визначення похибки процесів шліфування та швидкісного фрезерування з урахуванням статичної та динамічної неврівноваженості. *Технічні науки та технології.* 2020. № 3 (21). С. 72-78.

УДК 621.7-4
DOI: 10.25140/2411-5363-2020-3(21)-79-88

Владислав Полюшко, Андрій Єрошенко

ПРОВЕДЕННЯ ТОПОЛОГІЧНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ КРОНШТЕЙНА ТА ПІДГОТОВЛЕННЯ ДО 3D-ДРУКУ

Актуальність теми дослідження. *Зниження маси та збільшення питомої міцності конструкцій, що використовуються в різних галузях машинобудування – на сьогодні найважливіші завдання конструкторів всього світу. Рішення цих проблем безпосередньо пов'язане із завданням пошуку оптимальних геометричних параметрів проєктованого виробу. Застосування топологічної оптимізації дозволить зменшити вагу виробу зі збереженням вимог до міцності деталі.*

Постановка проблеми. *Отримати топологічно оптимізовану деталь, зменшивши масу на 30–50 %. Зберегти статичні характеристики та конструктивну міцність деталі.*

Аналіз останніх досліджень і публікацій*. Опираючись на досвід та роботу спеціалістів у цьому напрямі, проблема, яка зазначена вище, може бути вирішена за допомогою топологічної оптимізації та адитивних технологій.*

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. *Нині малодослідженим питанням залишається параметризація фізичної моделі для вирішення завдань топологічної оптимізації.*

Постановка завдання. *Зробити дослідження топології з метою отримання найкращого відношення міцності до маси кронштейна, зменшивши при цьому масу на 50 %. Зробити порівняння результатів досліджень у різних програмних пакетах. Підготувати вихідні моделі для швидкого прототипування за допомогою 3D-друку.*

Виклад основного матеріалу*. У цій роботі проводиться топологічна оптимізація кронштейна. Зменшуємо його масу на 50 %, зберігаючи всі статичні характеристики та параметри. Проєктуємо деталь у програмному пакеті SolidWorks. Проводимо оптимізацію у двох програмних пакетах: SolidWorks та Fusion 360, порівнюємо отримані результати. Друкуємо оптимізовану деталь на 3D-принтері, використовуючи програмний пакет Simplify 3D.*

Висновки відповідно до статті. *Оптимізовано конструкцію кронштейна в програмних пакетах SolidWorks і Fusion 360, зменшивши його масу на 50 %. Кронштейн, оптимізований в SolidWorks, виглядає естетично краще. Коефіцієнт запасу міцності кронштейна, оптимізованого в SolidWorks, дорівнює 12, а в Fusion 360 – 15. Це свідчить про те, що необхідно виконувати нове дослідження топології, видаляючи 60–65 % матеріалу.*

При підготовці до прототипування методом 3D-друку на виході отримали текстовий документ з g-кодом.

Ключові слова: *топологічна оптимізація; адитивні технології; 3D-друк.*

Рис.: 14. Бібл.: 12.

Актуальність теми дослідження. У сучасному світі, коли технології стрімко змінюють як повсякденне життя, так і область промислового виробництва, одним з ключових завдань для підприємств стає випуск більш якісної і конкурентоспроможної продукції. При цьому вимоги до окремих вузлів і агрегатів, зокрема й досить відповідальних, з часом можуть тільки зростати. Зниження маси і збільшення питомої міцності конструкцій в різних галузях виробництва – найважливіші завдання, що стоять сьогодні перед конструкторами всього світу. Рішення цих проблем безпосередньо пов'язане із завданням пошуку оптимальних геометричних параметрів проєктованого виробу.

Процес розробки та проєктування деталей вийшов на новий рівень з використанням адитивних технологій. Особливо це проявляється з нововведенням та застосуванням новітньої методики – топологічної оптимізації деталі, яка відіграє важливу роль у створенні полегшених конструкцій і ефективному використанні матеріалу [1; 2; 3]. Оптимізація деталі також сприяє більш рівномірному розподілу напружень по всій поверхні об'єкта оптимізації [4].

Крім завдань оптимізації жорсткості й міцності, топологічна оптимізація використовується в напрямку, розробки мікроструктур метаматеріалів. Наприклад, сконструювати таку мікроструктуру, щоб після її певного періодичного повторення і усереднення на макрорівні отримати пружні властивості, які б задовольняли умовам поставленої задачі [5].

У професійній мові авіабудівників є фразеологізм *buy-to-fly ratio*, який можна перекласти як «відношення того, що купили, до того, що полетіло». Тобто скільки матеріалу було куплено і скільки реально «полетіло» в ролі деталі у складі літака. За різними даними, цей показник становить 15:1 або навіть 20:1 для складних деталей. Використання адитивних технологій та топологічної оптимізації дозволяє звести цей показник до 1,5-2,0:1 [6].

© Єрошенко А. М., Полюшко В. Ю., 2020

Постановка проблеми. На сьогодні основними методами отримання заготовок деталей є лиття і обробка тиском. За допомогою цих методів можна отримати різноманітні деталі, різних габаритів та форм. Топологічна оптимізація та адитивні технології – це новий етап розвитку машинобудування. За допомогою цього методу можливе отримання деталей будь-яких форм та розмірів, які за допомогою лиття або обробки тиском було б отримати досить складно. Виготовлення надскладних пресформ вимагає залучення додаткової обробки на верстатах з ЧПК [7]. Це зумовлює великі економічні затрати, багато операцій, що впливає на час отримання кінцевого продукту.

Топологічна оптимізація та адитивні технології дають можливість отримати кінцевий продукт без залучення додаткових операцій обробки [8]. При цьому маса деталі зменшується на 30–50 %, зберігаючи всі статичні характеристики. Це дає можливість заощадити на матеріалі для виготовлення деталі, часі на підготовку виробництва, обсязі механічної обробки деталей тощо.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Адитивні технології в поєднанні з топологічною оптимізацією активно почали застосовуватися в різних галузях: машинобудуванні, медицині, архітектурі тощо [9; 10]. За допомогою даного підходу, друкуються габаритні конструкції, деталі машин, каркаси будівель, які можуть бути оптимізовані та зменшені у своїй вазі [11; 12].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Структурна оптимізація, тобто генерація оптимального дизайну навантажених конструкцій висвітлена в [11]. Однією із задач структурної оптимізації є топологічна оптимізація. Типова задача топологічної оптимізації виглядає приблизно так: для якоїсь заданої просторової конструкції, маючи конкретні обмеження у вигляді матеріалів, технологій та інших вимог, маючи інформацію про зовнішні навантаження, потрібно змоделювати оптимальну структуру, яка буде витримувати навантаження і задовольняти обмеженням.

Оптимальність може бути виражена, наприклад, у вигляді вимоги мінімізації загальної ваги конструкції. При обмеженнях у вигляді максимально допустимих напружень у матеріалі й допустимо можливих зміщеннях при заданих навантаженнях.

Постановка завдання. Метою роботи є дослідження топології з метою найкращого відношення міцності до маси кронштейна, зменшивши при цьому масу на 50 %. Порівняння результатів досліджень у програмних пакетах SolidWorks та Fusion 360. Підготовка вихідної моделі для швидкого прототипування за допомогою 3D-друку.

Виклад основного матеріалу. Для правильної постановки завдання необхідно розуміти, як деталь, яку необхідно оптимізувати, взаємодіє з іншими елементами складальної одиниці, який фізичний вплив на неї виконується. Приймаємо за предмет дослідження кронштейн, який тримає спойлер автомобіля. Для більш змістовної оцінки кінцевих результатів дослідження, топологічну оптимізацію кронштейна виконуємо у двох програмних пакетах: SolidWorks і Autodesk Fusion 360. Послідовність виконання розрахунків однакова.

Послідовність виконання досліджень:

- моделювання геометричної моделі;
- створення розрахункової моделі;
- створення дослідження в програмних пакетах;
- призначення матеріалу;
- визначення навантажень і граничних умов;
- створення сітки;
- виконання розрахунку;
- обробка результатів.

За допомогою методів розрахункової динаміки визначаються навантаження, які виникають на кронштейні. Відповідно до даних аналогів робимо таку розрахункову схему (рис. 1).

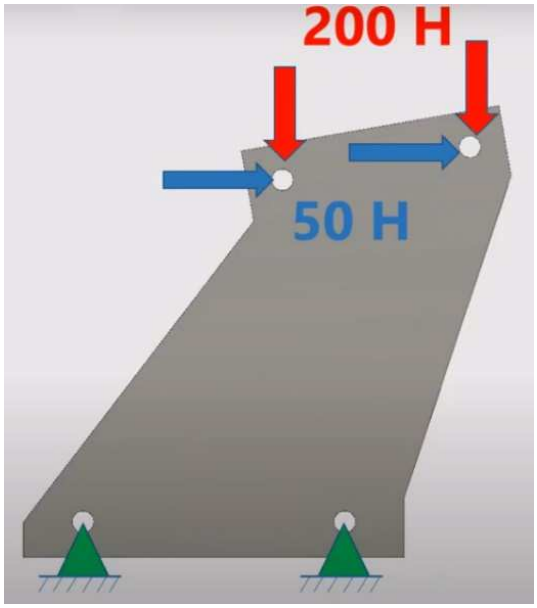


Рис. 1. Розрахункова модель

Сили діють у двох напрямках. 50 Н – горизонтальна сила, 200 Н – притискна сила, яка діє від спойлера. Кріплення – шарнірні.

Виконуємо статичний аналіз змодельованого кронштейна. Запускаємо нове дослідження і вибираємо статичний аналіз (рис. 2).

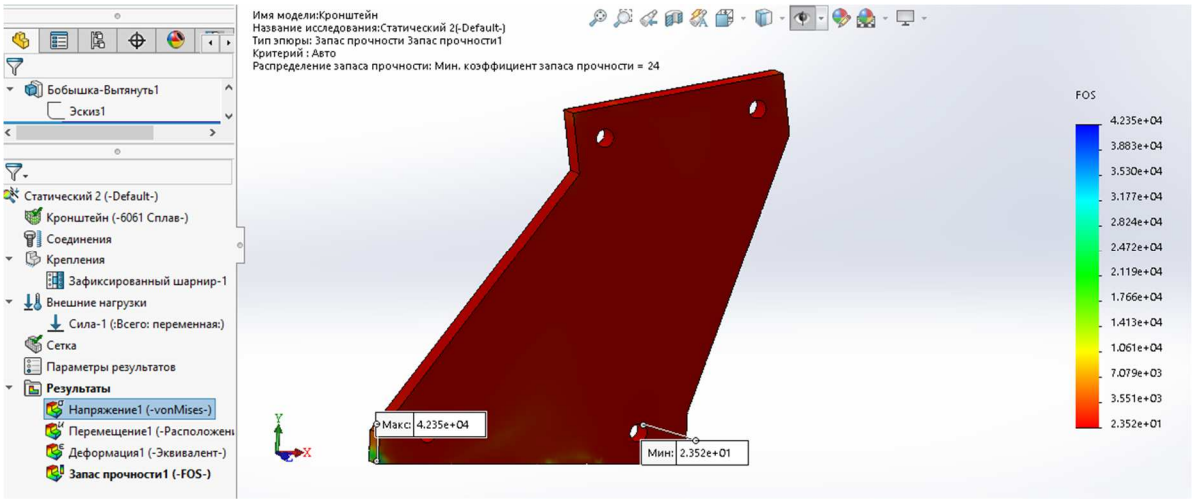


Рис. 2. Епюра запасу міцності

Як видно з рис. 2 запас міцності становить 24.

Наступним етапом є дослідження топології. Створюємо нове дослідження і вибираємо дослідження топології. Аналогічно зі статичним аналізом вказуємо такі ж матеріали, кріплення і сили.

Аналогічно зі статичним аналізом створюємо сітку. Запускаємо розрахунок і на виході отримуємо оптимізовану топологію у вигляді полігональної сітки з епюрою, яка відображає, які з ділянок можна видалити, а які необхідно зберегти (рис. 3).

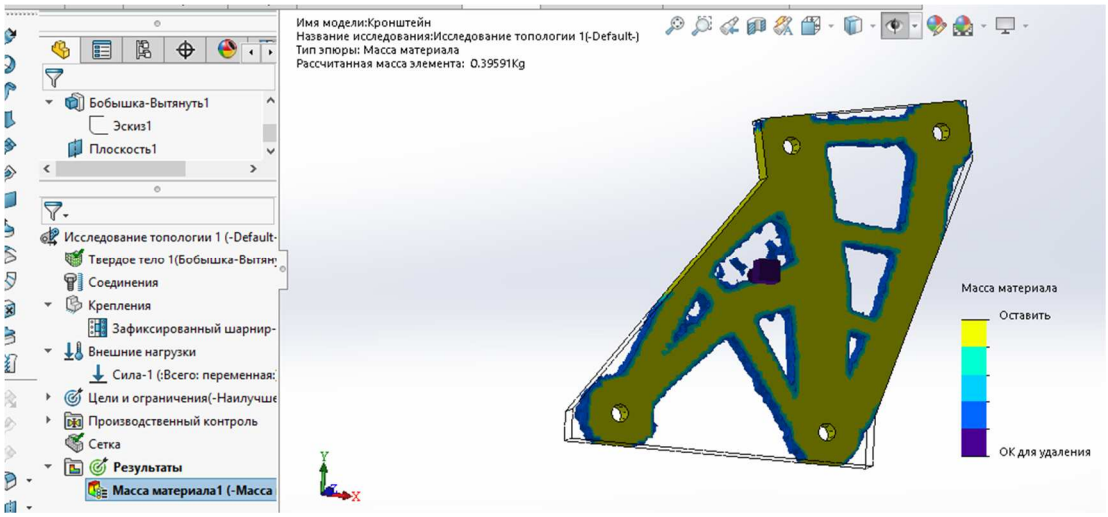


Рис. 3. Результат оптимізації топології

Створюємо ескіз і на основі результатів дослідження видаляємо зайвий матеріал (рис. 4).

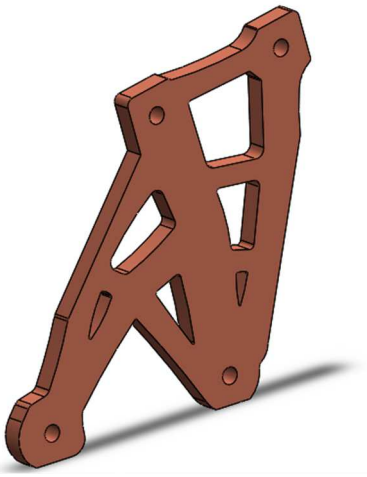


Рис. 4. Оптимізований кронштейн

Обов'язково виконуємо статичний аналіз оптимізованої деталі з такими ж заданими умовами, як і до оптимізації. Результати дослідження вказані на рис. 5.

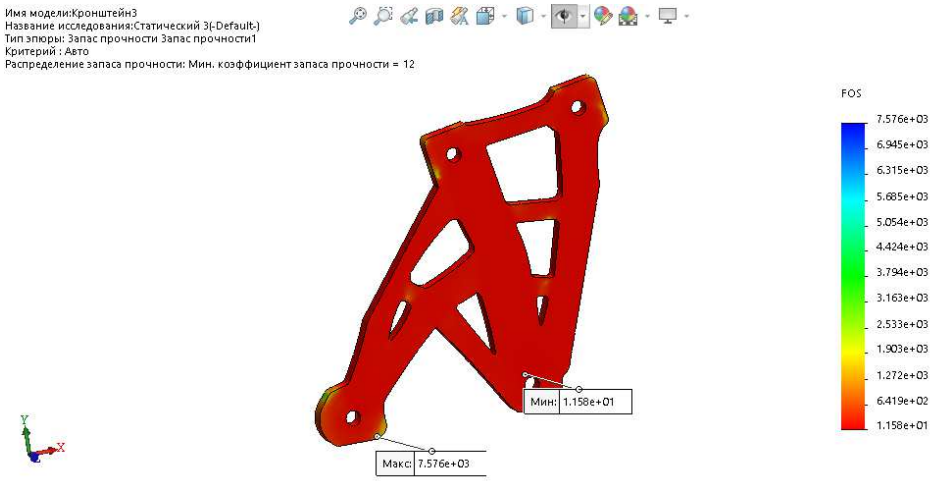


Рис. 5. Епюра запасу міцності

Мінімальний коефіцієнт запасу міцності дорівнює 12.

Проводимо аналіз в Fusion 360:

Змодельовану деталь зберігаємо у форматі *.step* і відкриваємо в Fusion 360. Послідовність виконання досліджень така ж сама, як і в SolidWorks.

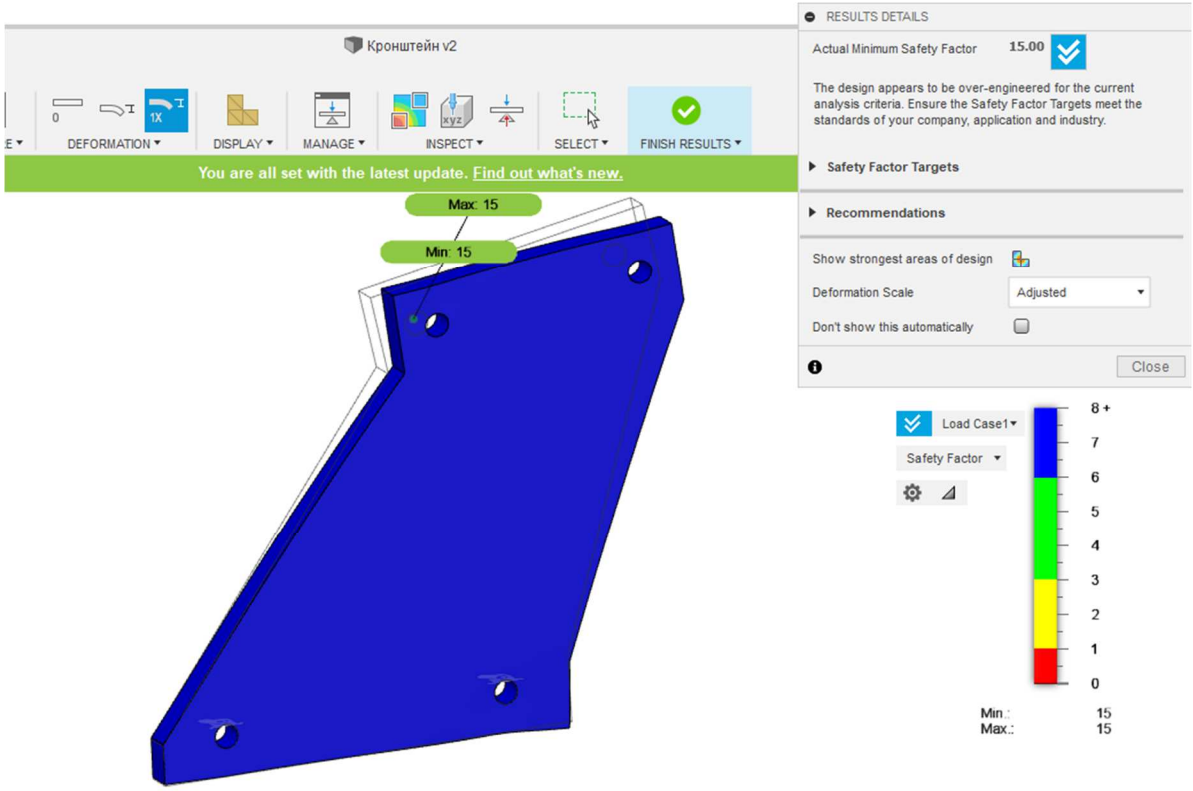


Рис. 6. Коефіцієнт запасу міцності

Коефіцієнт запасу міцності становить 15.

Створюємо дослідження оптимізації форм. Аналогічно зі статичним аналізом вказуємо такі ж матеріал, кріплення і сили. Створюємо скінчено-елементну сітку.

Визначаємо області, які необхідно зберегти (рис. 7).

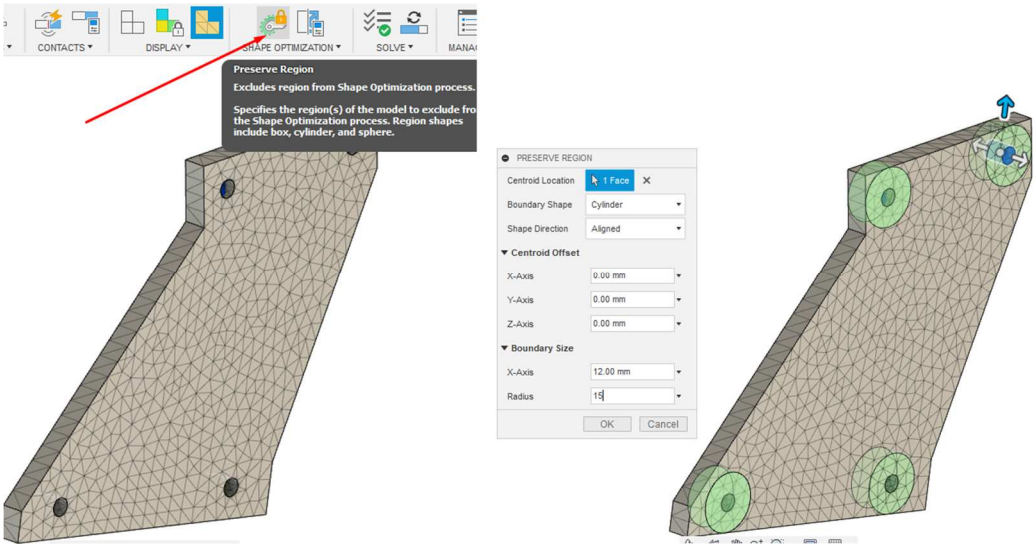


Рис. 7. Визначення областей, які необхідно зберегти

У результаті отримуємо епюру, на якій відображено частини тіла, які можна видалити, а які необхідно зберегти (рис. 8).

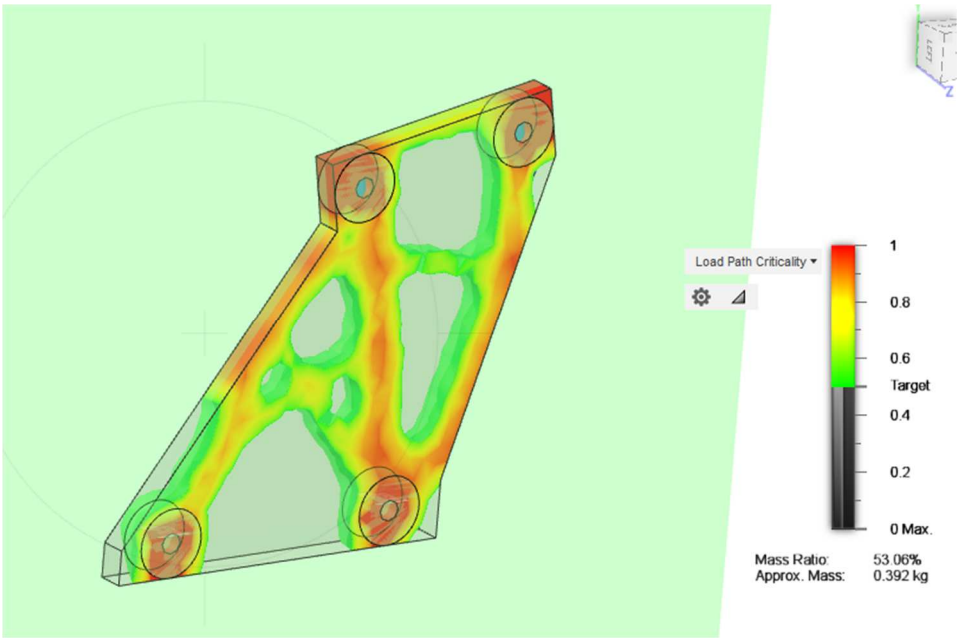


Рис. 8. Результат оптимізації

Зберігаємо результат як полігональну сітку (рис. 9).

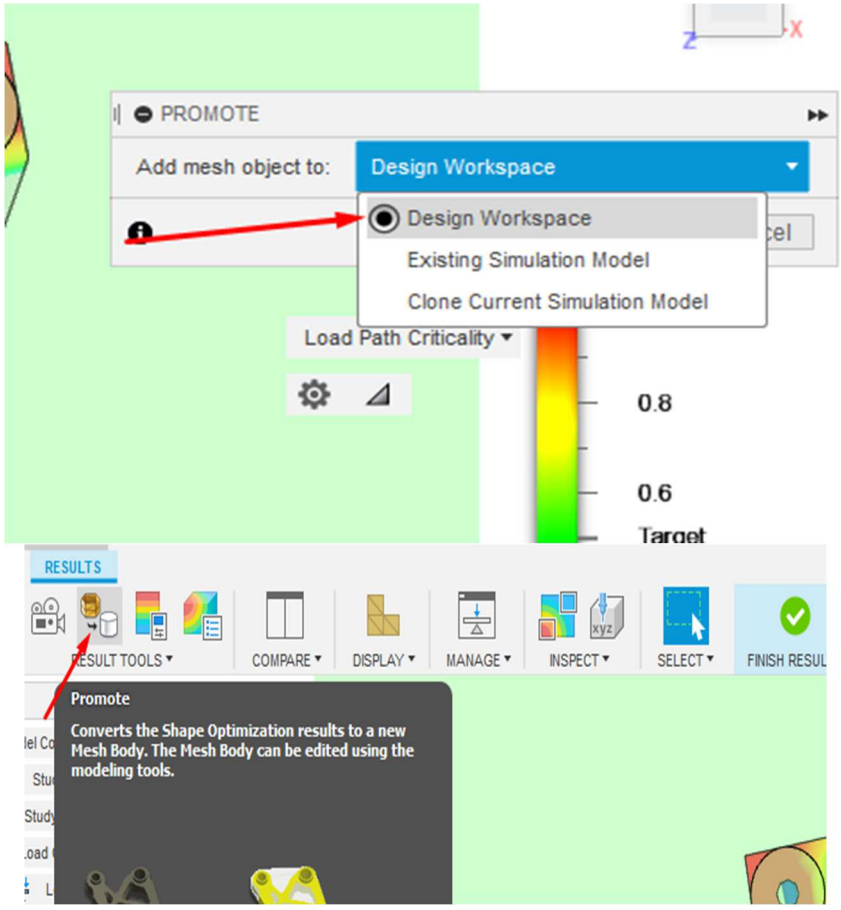


Рис. 9. Збереження результатів у вигляді полігональної сітки

Створюємо ескіз і на основі результатів дослідження видаляємо зайвий матеріал (рис. 10).

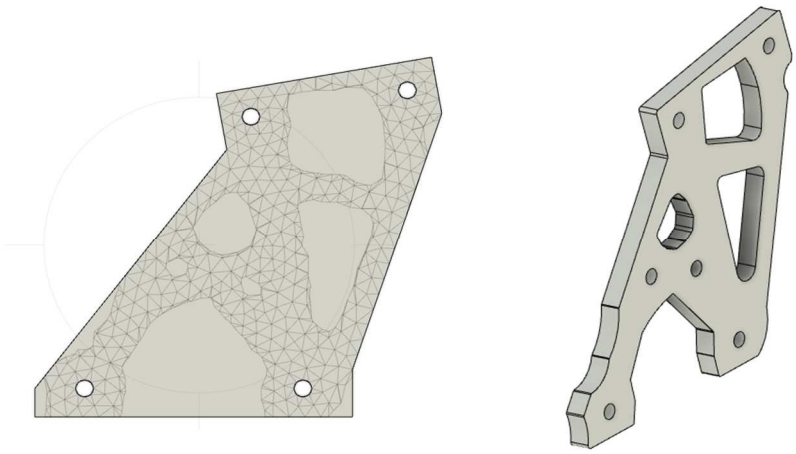


Рис. 10. Оптимізований кронштейн

Виконуємо статичний аналіз оптимізованої деталі згідно з заданою розрахунковою моделлю. Результати дослідження вказані на рис. 11.

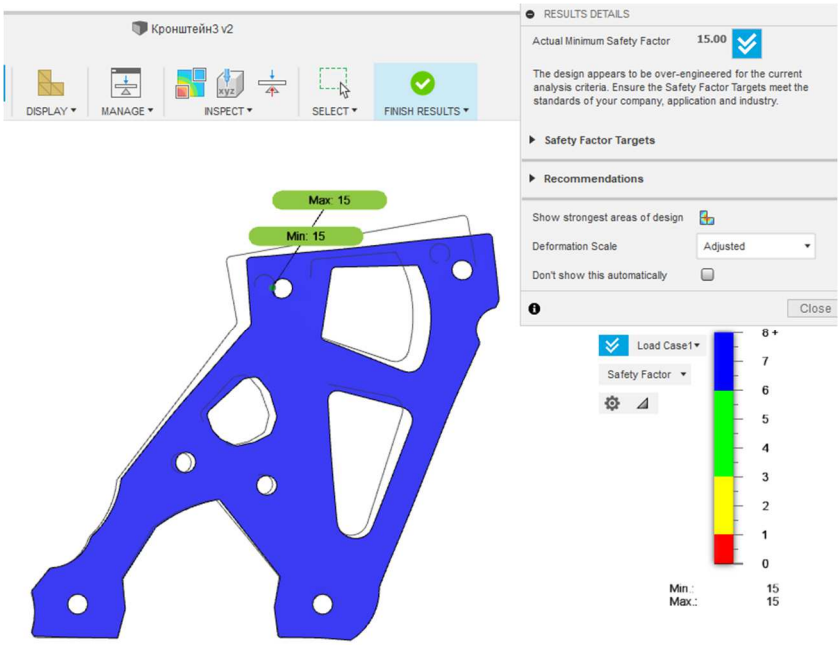


Рис. 11. Коефіцієнт запасу міцності

Коефіцієнт запасу міцності дорівнює 15.

Проводимо підготовку оптимізованих моделей до прототипування за допомогою 3D-друку.

Адитивні технології для виготовлення кінцевого продукту в цьому випадку не раціональні, але їх можемо використати в цілях швидкого прототипування. Прототип дає можливість адекватно оцінювати його естетичні і фізико-механічні характеристики.

Для прототипування будемо використовувати FDM технологію за наявності дельта 3D-принтера.

Є програмні пакети, в яких можемо підготувати моделі для слайсингу (Simplify 3D, Cura, PrusaSlicer). Не дивлячись на те, що Cura і PrusaSlicer у вільному доступі, зупиняємось на Simplify3D завдяки ряду переваг.

Після того, як вказали всі необхідні параметри, натискаємо кнопку «підготувати до друку» (рис. 12).

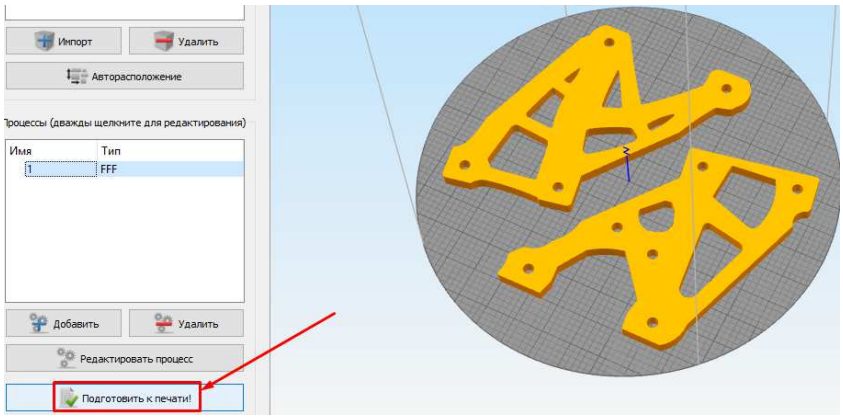


Рис. 12. Підготовка до друку

Після цього відкривається режим попереднього перегляду (рис. 13), де є можливість переглянути траєкторії руху екструдера, визначити місце розташування ретрактів, задавати потрібний для аналізу діапазон шарів.

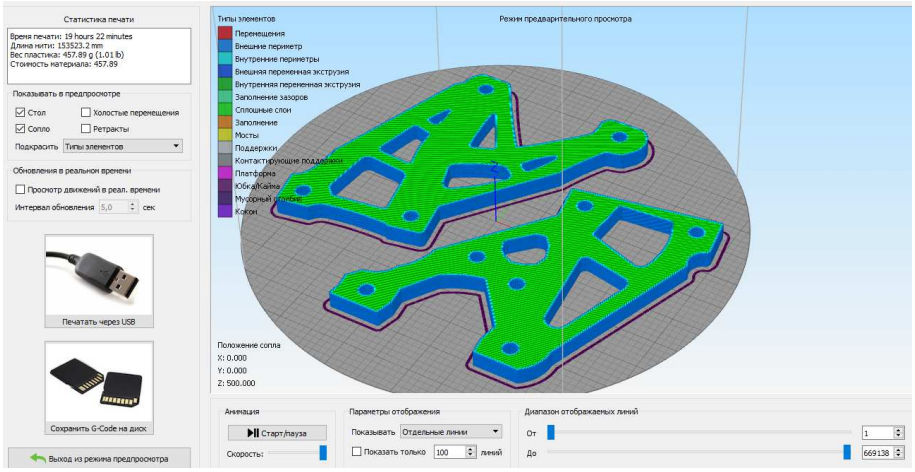
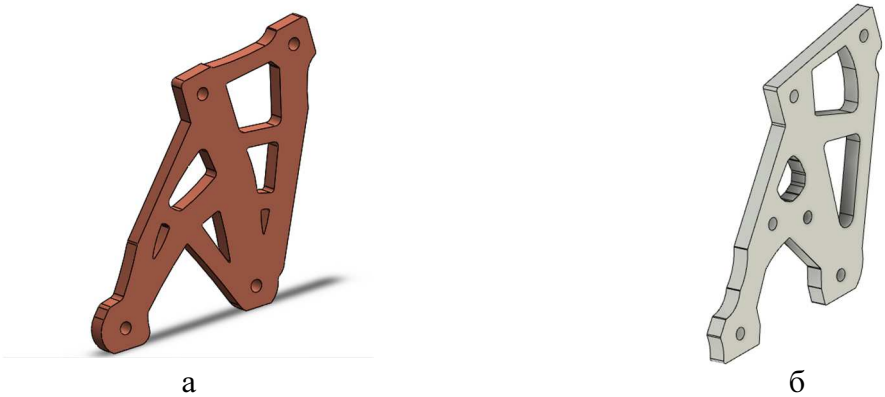


Рис. 13. Режим попереднього перегляду

При таких заданих параметрах, час друку становить 19 годин 22 хвилини, маса дорівнює 457,89 грама (пластик PLA). Зберігаємо g-код на диск і запускаємо 3D-друк.

Висновки відповідно до статті. Актуальність адитивних технологій і топологічної оптимізації тільки зростає. Дедалі більше виробництв не тільки прототипує, а й переходить на серійне виробництво, використовуючи адитивні технології. У цій роботі оптимізували конструкцію кронштейна в програмних пакетах SolidWorks і Fusion 360, зменшивши масу на 50% (рис. 14).



а б

Рис. 14. Оптимізовані кронштейни: а – в SolidWorks; б – в Fusion 360

Коефіцієнт запасу міцності кронштейна, оптимізованого в SolidWorks, дорівнює 12, а в Fusion 360 – 15. Це свідчить про те, що необхідно виконувати нове дослідження топології, видаляючи 60-65 % матеріалу. Суб'єктивно, кронштейн, оптимізований в SolidWorks, виглядає естетично краще.

При підготовці до прототипування методом 3D-друку на виході отримано текстовий документ з g-кодом.

Список використаних джерел

1. Weiss C. M., Marcus H. L. Selective Area Laser Deposition for Silicon Nitride Joining. *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium* / The University of Texas at Austin, August 6-8, 2012. 8 p.

2. Weiss C. M. Selective Area Laser Deposition For the Purpose of Ceramic Joining and Repair: a dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of doctor of philosophy. Mansfield : University of Connecticut, 2013. 130 p.

3. Boboulos M. A. CAD-CAM & Rapid Prototyping Application Evaluation. Frederiksberg : Ventus Publishing ApS, 2010. 174 p.

4. Pham D. T., Dimov S. S. Rapid Manufacturing: The Technologies and Applications of Rapid Prototyping and Rapid Tooling. London : Springer-Verlag, 2001. 214 p.

5. Теміс Ю. М., Якушев Д. А. Оптимізація конструкції деталей і вузлів ГТД. *Вісник СГАУ*. 2011. № 3-1. С. 183–188.

6. Боровиков А. А., Тененбаум С. М. Топологічна оптимізація перехідного відсіку КА. *Аерокосм. науч. журнал. МГТУ ім. Н. Е. Баумана*. 2016. № 05. С. 16–30.

7. Ковров О. М., Єрошенко А. М. Комплексне використання CAD/CAM/CAE систем у проектуванні та виготовленні прес-форм для лиття деталей зі складними криволінійними поверхнями. *Вісник Чернігівського державного технологічного університету: Серія: Технічні науки*. 2013. № 3(67). С. 111–119.

8. Kalchenko V. V., Yeroshenko A. M., Boyko S. V., Ignatenko P. L. Development and Research of Thermoplastic Methods for Hardening Details. *Natsionalnyi Hirnychyi Universytet. Naukovyi Visnyk.* 2020. Iss. 2. Pp. 53-60.

9. Камаєв С. В., Марков М. А., Новиков М. М., Вермель В. Д., Громишков А. Д. Виготовлення моделей складної просторової форми. *Перспективні матеріали*. 2011. № 13. С. 154–158.

10. Оганесян П. А., Шевцов С. Н. Оптимізація топології конструкцій в пакеті ABAQUS. *Вісник Самар. науч. центру РАН*. 2014. Т. 16. С. 543–549.

11. Jikai Liu, Yongsheng Ma. A survey of manufacturing oriented topology optimization methods. *Advances in Engineering Softwar*. 2016. August. Pp. 161–175.

12. Munk D. J., Vio G. A., Steven G. P. Topology and shape optimization methods using evolutionary algorithms: a review. *Struct Multidisc Optim.* September 2015. Vol. 52, iss. 3. Pp. 613–631.

References

1. Weiss, C. M., Marcus, H. L. (August 6-8, 2012). Selective Area Laser Deposition for Silicon Nitride Joining. *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*. The University of Texas at Austin.

2. Weiss, C. M. (2013). *Selective Area Laser Deposition For the Purpose of Ceramic Joining and Repair: a dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of doctor of philosophy*. University of Connecticut.

3. Boboulos, M. A. (2010). *CAD-CAM & Rapid Prototyping Application Evaluation.* Ventus Publishing ApS.

4. Pham, D. T., Dimov, S. S. (2001). *Rapid Manufacturing: The Technologies and Applications of Rapid Prototyping and Rapid Tooling*. Springer-Verlag.

5. Temis, Yu. M., Yakushev, D. A. (2011). Optimization of construction details and gas-turbine engine parts. *News of SSAU*, 3-1, pp. 183–188.

6. Borovikov, A. A., Tenenbaum, S. M. (2016). Topolohichna optymizatsiia perekhidnoho vidsiku KA [Topology of optimizing the transition of spacecraft]. *Aerokosm. nauch. zhurnal. MHTU im. N. E. Baumana – Aerospace. scientific magazine. MSTU im. NOT. Bauman: electron. Journal*, 05, pp. 16–30.

7. Kovrov, O. M., Yeroshenko, A. M. (2013). Kompleksne vykorystannya cad/cam/cae system u proektuvanni ta vyhotovlenni pres-form dlya lyttya detaley zi skladnymy kryvoliniynymy poverkhnyamy [Integrated use of cad / cam / cae systems in the design and manufacture of molds for casting

parts with complex curved surfaces]. *Visnyk Chernihivskoho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu: Seriia: Tekhnichni nauky – Bulletin of Chernihiv State Technological University: Series: Technical Sciences,* 3(67), pp. 111–119.

8. Kalchenko, V. V., Yeroshenko, A. M., Boyko, S. V., Ignatenko, P. L. (2020). Development and Research of Thermoplastic Methods for Hardening Details. *Natsionalnyi Hirnychyi Universytet. Naukovyi Visnyk*, 2, pp. 53-60.

9. Kamaev, S. V., Markov, M. A., Novikov, M. M., Vermel, V. D., Gromishkov, A. D. (2011). Vigotovlennya models folding folding space [Making models of complex spatial shape]. *Prospective materials*, 13, pp. 154–158.

10. Oganesyan, P. A., Shevtsov, S. N. (2014). Optimization of topology design in the ABAQUS package. *News Samar. scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 16, pp. 543–549.

11. Jikai Liu, Yongsheng Ma. (August 2016). A survey of manufacturing oriented topology optimization methods. *Advances in Engineering Softwar* (pp. 161–175).

12. Munk, D. J., Vio, G. A., Steven, G. P. (September 2015). Topology and shape optimization methods using evolutionary algorithms: a review. *Struct Multidisc Optim*, 52(3), pp. 613-631.

UDC 621.7-4

Vldyslav Polushko, Andriy Yeroshenko

TOPOLOGICAL OPTIMIZATION OF THE SUPPORT AND PREPARATION FOR 3D PRINTING

Urgency of the research. *Reducing the weight and increasing the specific strength of structures used in various fields of mechanical engineering - the most important tasks facing designers around the world today. The solution of these problems is directly related to the task of finding the optimal geometric parameters of the designed product. The use of topological optimization will reduce the weight of the product while maintaining the requirements for the strength of the part.*

Target setting. *Get a topologically optimized part, reducing the weight by 30 - 50%. Preserve static characteristics and structural strength of the part.*

Actual scientific researches and issues analysis. *Based on the experience and work of specialists in this field, this problem, which is mentioned above, can be solved with the help of topological optimization and additive technologies.*

Uninvestigated parts of general matters defining. *Currently, the little-studied issue is the parameterization of the neural network of the physical model to solve problems of topological optimization.*

The research objective. *To study the topology in order to best match the strength to the weight of the support, reducing the weight by 50%. Make a comparison of research results in different software packages. Prepare source models for rapid prototyping using 3D printing.*

The statement of basic materials. *In this work, the topological optimization of the support is performed. We reduce its weight by 50%, preserving all static characteristics and parameters. We design a part in the SolidWorks software package. We perform optimization in two software packages: SolidWorks and Fusion 360, we compare the results. We print the optimized part on a 3D printer using the Simplify 3D software package.*

Conclusions. *The support design in the SolidWorks and Fusion 360 software packages has been optimized, reducing its weight by 50%. The support optimized in SolidWorks looks aesthetically better. The margin of safety of the support optimized in SolidWorks is 12, and in Fusion 360 - 15. This indicates that it is necessary to perform a new topology study, removing 60-65 % of the material. In preparation for prototyping by 3D-printing at the output received a text document with g-code.*

Keywords: *Topological optimization, additive technologies, 3D printing.*

Fig.: 14. References: 12.

Єрошенко Андрій Михайлович – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри технологій машинобудування та деревообробки, Національний університет «Чернігівська політехніка» (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).
Yeroshenko Andrii – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Mechanical Engineering and Wood technology, Chernihiv Polytechnic National University (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).
E-mail: yeroshenkoam@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000–0002–1629–9516
Researcher iD: G–6757–2014
Scopus Author ID: 57193700687

Полюшко Владислав Юрійович – магістрант кафедри технологій машинобудування та деревообробки, Національний університет «Чернігівська політехніка» (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).
Polushko Vladyslav – master of mechanical engineering and wood technology department, Chernihiv Polytechnic National University (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).
E-mail: vpolushko.cntu@gmail.com

Полюшко В., Єрошенко А. Проведення топологічної оптимізації кронштейна та підготовлення до 3D-друку. *Технічні науки та технології.* 2020. № 3 (21). С. 79-88.

УДК 621.777.01
DOI: 10.25140/2411-5363-2020-3(21)-89-97

Наталія Грудкіна, Олег Марков

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ХОЛОДНОГО ВИДАВЛЮВАННЯ ЗІ СКЛАДНОЮ КОНФІГУРАЦІЄЮ ІНСТРУМЕНТУ

Актуальність теми дослідження. *Процеси холодного видавлювання забезпечують високу якість поверхні й точні розміри штампованих заготовок і деталей та завдяки цьому демонструють стійку тенденцію до розширення технологічних можливостей та впровадження на виробництві. Отримання інженерних формул розрахунків оптимального силового режиму, уявлення про характерні зони і межі розподілу течії металу та зон контакту деталі з інструментом, прогнозування формоутворення є актуальними завданнями, що потребують вирішення.*

Постановка проблеми. *Складні за формою деталі із суцільних або порожнистих заготовок доцільно виготовляти способами поперечного і комбінованого радіально-поздовжнього видавлювання. При цьому конфігурація інструменту (наявність фасок, заокруглень) дозволяють сформувати необхідний профіль деталі та суттєво впливають на деформаційний та силовий режими деформування. Визначення оптимального силового режиму у вигляді інженерних формул з урахуванням впливу конструктивних особливостей інструменту сприятиме більш активному впровадженню наведених процесів на виробництві.*

Аналіз останніх досліджень і публікацій. *На основі аналізу публікацій за останні роки було встановлено, що дослідження процесів холодного поздовжньо-поперечного видавлювання переважно проведені експериментально, методом скінченних елементів та стосуються визначення силового режиму, особливостей формозмінення та дефектоутворення напівфабрикату.*

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. *Невирішеними залишаються питання щодо отримання інженерних формул розрахунку силового режиму (особливо за наявності складної форми інструменту), що вказує на недостатню придатність отриманих результатів для використання на виробництві.*

Метою статті *є розширення технологічних можливостей процесів холодного видавлювання на основі розробки нових кінематичних модулів складної форми та вироблення відповідних рекомендацій щодо їх використання для отримання оцінки силового режиму деформування та визначення оптимальної конфігурації інструменту.*

Виклад основного матеріалу. *У роботі запропоновано використання наближеної кривої у якості заміни чверті кола, що відображає заокруглення матриці. Встановлено, що відхилення довжини дуги наближеної кривої та площі криволінійної трапеції, що обмежена нею, не перевищує 0,8 %, що вказує на адекватність запропонованої заміни. Проведено розрахунки приведеного тиску деформування всередині кінематичного модуля із заокругленням. Встановлено, що радіус заокруглення можна використовувати у вигляді параметра оптимізації конфігурації інструменту за величиною приведеного тиску деформування.*

Висновки відповідно до статті. *Розроблений новий кінематичний модуль із заокругленням дозволяє розширити можливості енергетичного методу для моделювання процесів холодного видавлювання із складною формою інструменту. Це дозволить надалі використовувати наведені розрахунки в нових схемах та сприятиме отриманню оцінки силового режиму та формозмінення і, як наслідок, виробленню рекомендацій щодо оптимальної конфігурації інструменту та більш активному впровадженню цих процесів на виробництві.*

Ключові слова: *математичне моделювання; процеси комбінованого видавлювання; кінематичний модуль; енергетичний метод; процес деформування.*

Рис.: 4. Табл.: 1. Бібл.: 14.

Актуальність теми дослідження. Процеси холодного видавлювання забезпечують високу якість поверхні й точні розміри штампованих заготовок і деталей та завдяки цьому демонструють стійку тенденцію до розширення технологічних можливостей та впровадження на виробництві. Отримання інженерних формул розрахунків оптимального силового режиму, уявлення про характерні зони та межі розподілу течії металу й зон контакту деталі з інструментом, прогнозування формоутворення є актуальними завданнями, що потребують вирішення.

Постановка проблеми. Складні за формою деталі із суцільних або порожнистих заготовок доцільно виготовляти способами поперечного і комбінованого радіально-поздовжнього видавлювання. При цьому конфігурація інструменту (наявність фасок, заокруглень та ін.) дозволяють не тільки сформувати необхідний профіль деталі, а й суттєво впливають на деформаційний та силовий режими деформування. Визначення оптимального силового режиму у вигляді інженерних формул з урахуванням впливу конструктивних особливостей інструменту сприятиме більш активному впровадженню наведених процесів на виробництві.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В останні роки дослідженням процесів радіально-поздовжнього (послідовного або суміщеного) видавлювання присвячено багато робіт [1-9]. При цьому аналіз силових і деформаційних режимів цих процесів виконано

© Грудкіна Н. С., Марков О. Є., 2020

переважно експериментально, на основі скінченно-елементного аналізу й методами верхньої оцінки. Способи «безматричного видавлювання» застосовують для виготовлення глибоких порожніх судин, що значно знижує питомі сили деформування в порівнянні з використанням зворотного видавлювання [3; 4]. У роботі [5] представлено силові характеристики процесу послідовного радіально-прямого видавлювання, проаналізовано вплив конструктивних параметрів і різних умов тертя. Перевірка достовірності результатів кінцево-елементного моделювання виконувалася на експериментальних даних за зусиллям деформування. У роботі [6] досліджували вплив конструктивних геометричних параметрів процесу послідовного радіально-прямого видавлювання (величини кільцевого зазору, товщини фланця та радіуса оправлення) на коливання навантаження. Висновок про незначний вплив на формування навантаження на пуансон і контрпуансон радіусів заокруглень перехідних ділянок інструменту викликають сумніви. Інтерес викликає дослідження експериментальним шляхом і методом верхньої оцінки способу комбінованого радіально-прямого видавлювання з використанням додаткового гідростатичного тиску в осередку деформації і введенням знакозмінного характеру деформації [7]. Значне збільшення міцності з дуже низькою втратою пластичності й високою однорідністю показників твердості деталі поряд зі зниженням загального навантаження є вагомими перевагами цього способу. Багато досліджень присвячені питанням оцінки напружено-деформованого стану заготовки та інструменту, дефектоутворення та деформованості металу заготовок при холодному комбінованому видавлюванні [8; 9]. У роботі [8] отримано оцінку напружено-деформованого стану (НДС), розрахунки ресурсу пластичності за різними критеріями для процесу комбінованого радіально-прямого видавлювання. Основною метою скінченно-елементного аналізу процесу радіально-прямого видавлювання [9] було вивчення впливу геометрії інструменту на НДС заготовки і знос інструменту. Однак переважна частина досліджень має обмежений характер та не дає інженерних формул розрахунку силового режиму (особливо за наявності складної форми інструменту), що вказує на недостатню придатність отриманих результатів для використання на виробництві.

Треба зазначити, що ефективним теоретичним методом розрахунків процесів холодного видавлювання є енергетичний метод балансу потужностей [10]. Цей метод дозволяє прогнозувати силовий режим деформування та формоутворення і дефектоутворення напівфабрикату. Причому цей метод дозволяє отримати величину приведеного тиску деформування в аналітичному вигляді з подальшою оптимізацією за геометричними чи кінематичними параметрами, а за деяких умов для процесів комбінованого суміщеного видавлювання і прирости напівфабрикату. Розвитку можливостей енергетичного методу балансу потужностей на основі розширення бази кінематичних модулів складної конфігурації присвячено багато робот [11-14]. Основні результати досліджень дозволяють враховувати особливості конфігурації інструменту [11; 12], форми меж розподілу течії металу всередині заготовки. Виявлено проблеми ускладнення математичного апарату при отриманні величини приведеного тиску деформування (в аналітичному вигляді) всередині кінематичного модуля трикутної або трапецієподібної форми з похилими межами. Чимало робіт присвячено вирішенню цих проблем - пошуку прийомів спрощення виразів приведеного тиску деформування та отримання відповідних інженерних формул розрахунків силового режиму процесів холодного видавлювання [11-14].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. На основі літературного огляду встановлено, що оцінка технологічних можливостей процесів холодного видавлювання на основі розширення можливостей енергетичного методу балансу потужностей має важливе наукове та практичне значення, яке підтверджує актуальність роботи. Розширення бази уніфікованих кінематичних модулів складної конфігурації дозволить отримати оцінку силового режиму та формоутворення деталі у процесах холодного ви-

давлювання, що відповідає дійсності. Використання в розрахункових схемах цих процесів кінематичних модулів із похилими криволінійними межами натомість елементарних прямокутних модулів вимагає додаткових досліджень. Розробка нових кінематичних модулів складної конфігурації (особливо з заокругленнями) та рекомендацій щодо доцільності їх використання в розрахункових схемах досліджуваних процесів сприятиме вирішенню питань отримання адекватної оцінки оптимального силового режиму.

Метою статті є розширення технологічних можливостей процесів холодного видавлювання на основі розробки нових кінематичних модулів складної форми та вироблення відповідних рекомендацій щодо їх використання для отримання оцінки силового режиму деформування та визначення оптимальної конфігурації інструменту.

Виклад основного матеріалу. У межах використання енергетичного методу верхньої оцінки важливе місце відіграє розбиття об'єму заготовки на комплекс кінематичних модулів розрахункової схеми процесу. При цьому можлива побудова величезної кількості різних наборів кінематичних модулів із різними кінематично можливими полями швидкостей (КМПШ). Форма межі розділу течії металу всередині заготовки або складна конфігурація інструменту вимагає використання кінематичних модулів із криволінійною межою трикутної або трапеціїподібної форми. Надалі найбільш ефективною вважається розрахункова схема з мінімальною величиною приведеного тиску деформування. При цьому для розрахункових схем комбінованого видавлювання із наявністю роз'єднаного або суміщеного осередків деформації можливим є використання результатів одного з автономних осередків деформації. Наявність широкого кола процесів видавлювання із розвинутою радіальною складовою течії металу вимагає більш детального дослідження з точки зору відображення картини течії металу в зоні розвороту до радіальної течії і далі з течією до фланцевої зони з урахуванням наявності фасок або заокруглень на поверхні контакту матриці із заготовкою (рис. 1, 2).

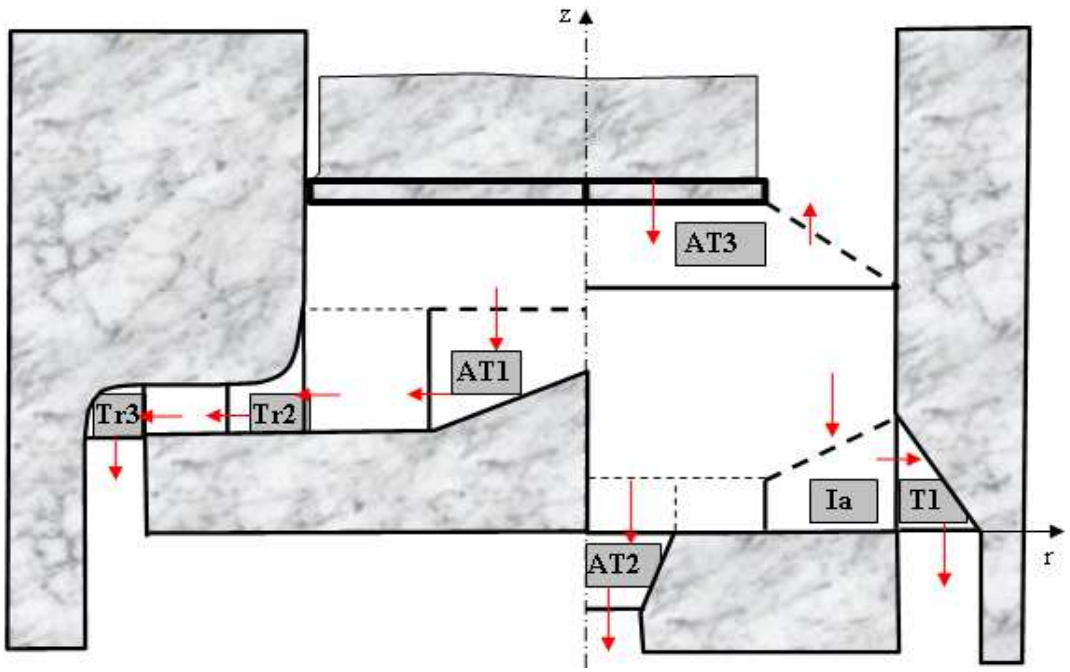
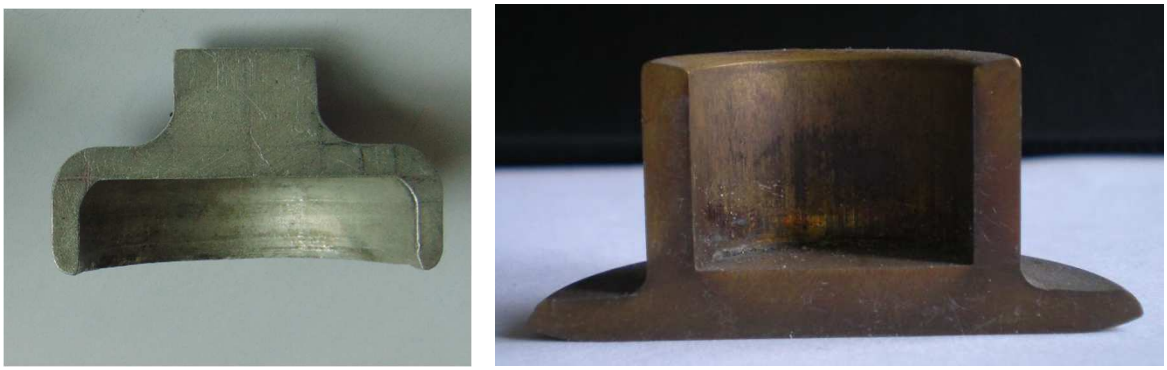


Рис. 1. Узагальнена схема комбінованого видавлювання

Основними кінематичними модулями складної форми є трапеціїподібні осьові (рис. 1, AT1, AT2, AT3), внутрішні (рис. 1, Ia) та кінематичні модулі трикутної або трапеціїподібної форми, що дозволяють враховувати форму поверхні контакту інструменту та заготовки у фланцевій зоні (T1, Tr2, Tr3).



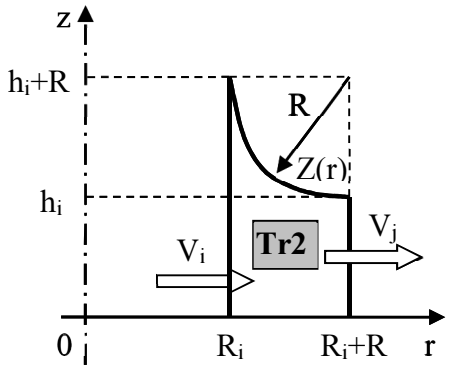
а *б*

Рис. 2. Отримані деталі з наявністю заокруглень: а – комбіноване радіально-пряме видавлювання з роздачею; б – комбіноване радіально-зворотне видавлювання

База уніфікованих кінематичних модулів із похилою прямолінійною межею включає трапецієподібні кінематичні модулі, для яких проведено розрахунки потужності сил деформування, тертя та зрізу між суміжними модулями. Однак для випадку вісесиметричної задачі питання врахування межі у вигляді чверті кола не вирішене. Взагалі трапецієподібний модуль із криволінійною похилою межею має такий вигляд та відповідне КМПШ (таблиця).

Таблиця

Схема та КМПШ кінематичного трапецієподібного модуля

Схема кінематичного модуля	**КМПШ кінематичного модуля**
	КМПШ кінематичного трапецієподібного модуля: $\begin{cases} V_z = \dfrac{R_i(h_i+R)V_i}{rz^2(r)}z'(r)\cdot z, \\ V_r = \dfrac{R_i(h_i+R)V_i}{rz(r)}, \end{cases}$ де $z(r)$ – будь-яка крива, що проходить через точки (R_i, h_i+R) та (R_i+R, h_i).

Використання цього кінематичного модуля із прямолінійною межею не викликає труднощів, однак використання як функції $z(r)$ – чверті кола радіусу R з центром у точці (R_i+R, h_i+R) не є можливим з огляду на не існування $z'(R_i)$, це не уможливлює подальші розрахунки потужності сил зрізу на поверхні входу до модуля та потужності сил деформування. Таким чином, постає проблема пошуку кривої, наближеної до $z(r) = h_i + R - \sqrt{R^2 - (r-(R_i+R))^2}$, аналітичної для $r \in [R_i; R_i+R]$.

Розглянемо криву:

$$z_1(r) = \frac{A}{r - R_i\left(1 - \dfrac{R}{2\pi}\right)} + B, \qquad (1)$$

де $A = \dfrac{R^2 R_i}{2\pi}\left(1 + \dfrac{R_i}{2\pi}\right)$; $B = h_i + R - \dfrac{2\pi A}{R_i R}$.

Продемонструємо відмінність даної кривої від чверті кола (рис. 3), переходячи до відносних величин $\overline{R}_i = 1$, $\overline{R} = R / R_i$, $\overline{h}_i = h_i / R_i$. Крива чверті кола відображена червоною лінією, наближена крива – чорною пунктирною лінією. Характер зміни кривих наближено подібний.

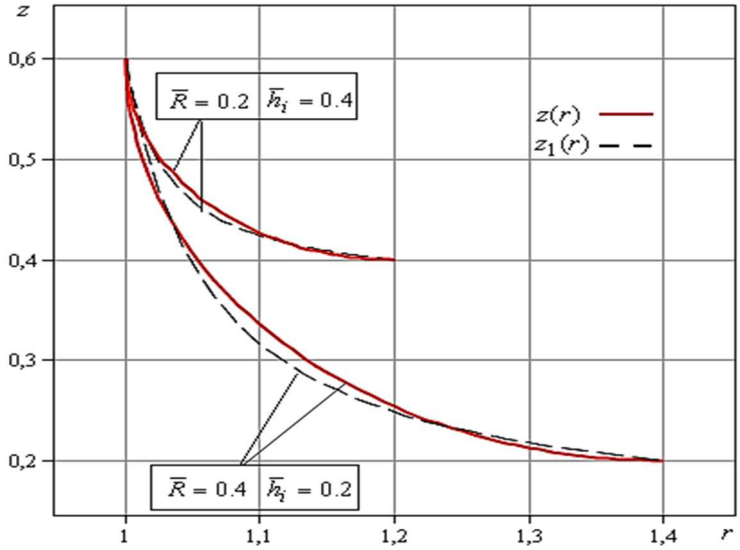


Рис. 3. Порівняльний аналіз поведінки кривих $z(r) = h_i + R - \sqrt{R^2 - (r - (R_i + R))^2}$ та $z_1(r)$

Відхилення за довжиною дуги (перевищення l_1 за кривою $z_1(r)$ відносно довжини l чверті кола) становить до 0,8 %, а за площею криволінійної трапеції, згори обмеженої даними кривими, становить ще менше. Отже, крива $z_1(r) = \dfrac{A}{r - R_i\left(1 - \dfrac{R}{2\pi}\right)} + B$ може бути використана у вигляді наближеної заміни чверті кола. Ця заміна надає можливість використання КМПШ у наведеному вище вигляді (табл. 1) та на відміну від чверті кола $z_1'(R_i) \neq 0$, що надає можливість проводити необхідні розрахунки.

Запишемо складові приведеного тиску деформування всередині кінематичного модуля Tr2 із урахуванням потужності сил деформування, зрізу на поверхні між суміжними кінематичними модулями та тертя на поверхні контакту інструменту та заготовки. Розглядання умов тертя буде в межах, характерних для процесів холодного видавлювання $\mu_S = 0,08$. Наведемо потужності сил тертя на поверхні заокруглення та на нижній межі кінематичного модуля у вигляді:

$$N_{t0} = \frac{4\pi\sigma_S\mu_S V_i R_i (h_i + R)}{\sqrt{3}B}\left[R - \frac{A}{B}\ln\left|\frac{BR\left(1 + \dfrac{R_i}{2\pi}\right) + A}{B\dfrac{R_i R}{2\pi} + A}\right|\right]; \quad (2)$$

$$N_{t1} = N_{t0} + \frac{4\pi\sigma_S\mu_S V_i R_i (h_i + R)A}{\sqrt{3}}\left[\frac{B^2}{A^2}\ln\left|\frac{\left(\dfrac{R_i R}{2\pi} + \dfrac{A}{B}\right)C}{\dfrac{R_i R}{2\pi}\left(C + \dfrac{A}{B}\right)}\right| + \frac{B}{A}\left(\frac{1}{C} - \frac{2\pi}{R_i R}\right) - \frac{1}{2}\left(\frac{1}{C^2} - \frac{4\pi^2}{R_i^2 R^2}\right)\right], \quad (3)$$

де $C = R\left(1+\frac{R_i}{2\pi}\right)$.

Потужність сил деформування всередині кінематичного модуля знаходимо у вигляді верхньої оцінки за Коші-Буняковським:

$$N_d \le \sigma_S \sqrt{M \cdot W}, \tag{4}$$

де $M = \iiint_V \dot{\varepsilon}_i^2 dV$, $\dot{\varepsilon}_i$ – інтенсивність швидкостей деформації;

$V = 2\pi\left[A\left(R + R_i\left(1-\frac{R}{2\pi}\right)\ln\left|\frac{2\pi C}{R_i R}\right|\right) + B\frac{(R_i+R)^2 - R_i^2}{2}\right]$ – об'єм модуля.

Якщо вважати сусідніми кінематичними модулями уніфіковані модулі для випадку радіального видавлювання, потужності сил зрізу приймають вигляд:

$$N_{ci} = \frac{\pi\sigma_S(h_i+R)}{\sqrt{3}}\left[\frac{4\pi^2 A V_i}{R_i R^2} - V_0 R_i\right]; \tag{5}$$

$$N_{cj} = \frac{\pi\sigma_S R_i(h_i+R)A}{\sqrt{3}C^2}. \tag{6}$$

Величина приведеного тиску деформування кінематичного модуля Tr2 із урахуванням (2) – (6)приймає вигляд:

$$\bar{p} = \frac{N_d + N_{ci} + N_{cj} + N_{t0} + N_{t1}}{\pi\sigma_S V_0 R_i^2}. \tag{7}$$

Для дослідження питання можливості оптимізації радіуса заокруглення необхідно розглядання величини приведеного тиску деформування обов'язково з урахуванням потужності сил зрізу між суміжними кінематичними модулями. Проаналізуємо поведінку величини приведеного тиску деформування $\bar{p}$, розрахованих за (7), залежно від радіусу заокруглення матриці R (рис. 4). За будь-яких значень товщини фланцевої зони криві приведеного тиску деформування мають точку мінімуму, що вказує на можливості оптимізації форми інструменту за радіусом заокруглення. При цьому зі збільшенням товщини фланцевої зони оптимальне значення радіуса заокруглення теж збільшується поряд зі зменшенням самої величини приведеного тиску деформування.

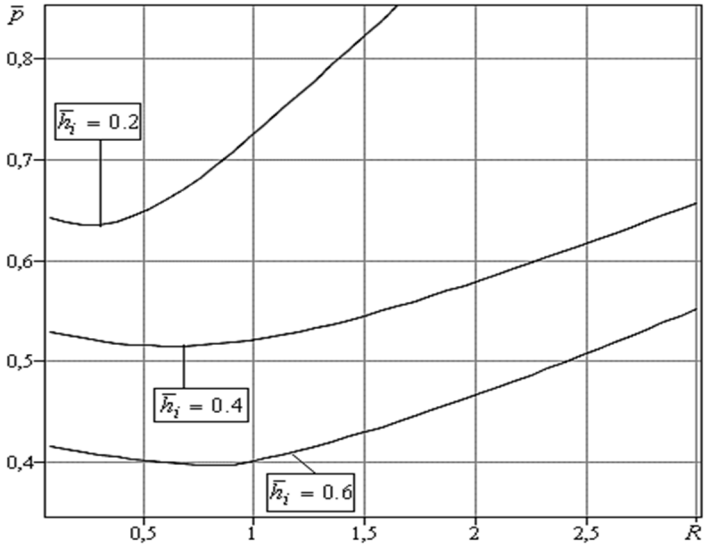


Рис. 4. Змінення величини приведеного тиску деформування при $\mu_S = 0{,}08$ за різних $\overline{h}_i$

Висновки відповідно до статті. Запропоновано використання кривої вигляду $z_1(r)$ як заміна чверті кола, що відображає заокруглення матриці. Встановлено, що відхилення довжини дуги наближеної кривої та площі криволінійної трапеції, що обмежена нею, не перевищує 0,8 %, що вказує на адекватність запропонованої заміни. Проведено розрахунки приведеного тиску деформування всередині кінематичного модуля із заокругленням. Встановлено, що радіус заокруглення можна використовувати у вигляді параметра оптимізації конфігурації інструменту за величиною приведеного тиску деформування. Розроблений новий кінематичний модуль із заокругленням дозволяє розширити можливості енергетичного методу для моделювання процесів холодного видавлювання зі складною формою інструменту. Це дозволить надалі використовувати наведені розрахунки в нових схемах та сприятиме отриманню оцінки силового режиму та формозмінення і, як наслідок, виробленню рекомендацій щодо оптимальної конфігурації інструменту та більш активному впровадженню даних процесів на виробництві.

Список використаних джерел

1. Bhaduri A. Extrusion. *Mechanical Properties and Working of Metals and Alloys.* 2018. Pp. 599-646. URL: https://doi.org/10.1007/978-981-10-7209-3_13.

2. Aliev I. S. Radial extrusion processes. *Soviet Forging and Sheet Metal Stamping Technology.* 1988. Vol. 6. Pp. 1-4.

3. Ренне И. П., Сумарокова А. И. Технологические возможности процесса свободного выдавливания (без матрицы) полых деталей. *Кузнечно-штамповочное производство*. 1987. № 6. С. 25–26.

4. Kalyuzhnyi V. L., Aliieva L. I., Kartamyshev D. A., Savchinskii I. G. Simulation of Cold Extrusion of Hollow Parts. *Metallurgist*. 2017. Vol. 61, № 5-6. Pp. 359-365. URL: https://doi.org/10.1007/s11015-017-0501-1.

5. Lee Y. S., Hwang S. K., Chang Y. S., Hwang B. B. The forming characteristics of radial-forward extrusion. *Journal of Materials Processing Technology*. 2001. Vol. 113, № 1-3. Pp. 136–140. URL: https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00705-1.

6. Jafarzadeh H., Zadshakoyan M., Abdi Sobbouhi, E. Numerical studies of some important design factors in radial–forward extrusion process. *Materials and Manufacturing Processes.* 2010. № 25. Pp. 857–863. URL: https://doi.org/10.1080/10426910903536741.

7. Savarabadi M., Faraji G., Zalnezhad E. Hydrostatic tube cyclic expansion extrusion (HTCEE) as a new severe plastic deformation method for producing long nanostructured tubes. *Journal of Alloys and Compounds.* 2019. № 785. Pp. 163–168. URL: https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.01.149.

8. Ogorodnikov, V., Derevenko, I., Sivak, R. On the Influence of Curvature of the Trajectories of Deformation of a Volume of the Material by Pressing on Its Plasticity Under the Conditions of Complex Loading. *Materials Science.* 2018. Vol. 54, № 3, 326–332. URL: https://doi.org/10.1007/s11003-018-0188-x.

9. Noh J., Hwang B. B. Numerical analysis of tool geometry effect on the wear characteristics in a radial forward extrusion. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2015. Vol. 29, № 8. Pp. 3447–3457. URL: https://doi.org/10.1007/s12206-015-0743-4.

10. Шестаков Н. А. Энергетические методы расчета процессов обработки металлов давлением : учебное пособие. Москва : МГИУ, 1998. 125 с.

11. Hrudkina N. S., Aliieva L. I. Modeling of cold extrusion processes using kinematic trapezoidal modules. *FME Transactions*. 2020. Vol. 48, № 2. Pp. 357-363. DOI: 10.5937/fme2002357H.

12. Aliieva L., Hrudkina N., Aliiev I., Zhbankov I., Markov O. Effect of the tool geometry on the force mode of the combined radial-direct extrusion with compression. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 2/1(104). Pp. 15–22. URL: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.198433.

13. Hrudkina N., Aliieva L., Markov O., Kartamyshev D., Shevtsov S., Kuznetsov M. Modeling the process of radial-direct extrusion with expansion using a triangular kinematic module. *Eastern-*

European Journal of Enterprise Technologies. 2020. Vol. 3/1 (105). Pp. 17–22. URL: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.203989.

14. Hrudkina N., Aliieva L., Abhari P., Markov O., Sukhovirska L. Investigating the process of shrinkage depression formation at the combined radial-backward extrusion of parts with a flange. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 2, № 5/1 (101). Pp. 49–57. URL: https://doi:10.15587/1729-4061.2019.179232.

References

1. Bhaduri, A. (2018). Extrusion. *Mechanical Properties and Working of Metals and Alloys*, pp. 599–646. https://doi.org/10.1007/978-981-10-7209-3_13.

2. Aliev, I. S. (1988). Radial extrusion processes. *Soviet Forging and Sheet Metal Stamping Technology,* 6, pp. 1-4.

3. Renne, I. P., Sumarokova, A. I. (1987). Tehnologicheskie vozmozhnosti protsessa svobodnogo vydavlivaniia (bez matritsy) polykh detalei [Technological capabilities of the process of free extrusion (without a matrix) of hollow parts]. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo*, 6, 25–26.

4. Kalyuzhnyi, V. L., Aliieva, L. I., Kartamyshev, D. A., Savchinskii, I. G. (2017). Simulation of Cold Extrusion of Hollow Parts. *Metallurgist, 61*(5-6), pp. 359-365. https://doi.org/10.1007/s11015-017-0501-1.

5. Lee, Y. S., Hwang, S. K., Chang, Y. S., Hwang, B. B. (2001). The forming characteristics of radial-forward extrusion. *Journal of Materials Processing Technology*, *113*(1-3), pp. 136–140. https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00705-1.

6. Jafarzadeh, H., Zadshakoyan, M., Abdi Sobbouhi, E. (2010). Numerical studies of some important design factors in radial–forward extrusion process. *Materials and Manufacturing Processes*, 25, pp. 857–863. https://doi.org/10.1080/10426910903536741.

7. Savarabadi, M., Faraji, G., Zalnezhad, E. (2019). Hydrostatic tube cyclic expansion extrusion (HTCEE) as a new severe plastic deformation method for producing long nanostructured tubes. *Journal of Alloys and Compounds*, 785, pp. 163–168. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.01.149.

8. Ogorodnikov, V., Derevenko, I., Sivak, R. (2018). On the Influence of Curvature of the Trajectories of Deformation of a Volume of the Material by Pressing on Its Plasticity Under the Conditions of Complex Loading. *Materials Science, 54*(3), pp. 326–332. https://doi.org/10.1007/s11003-018-0188-x.

9. Noh, J., Hwang, B. B. (2015). Numerical analysis of tool geometry effect on the wear characteristics in a radial forward extrusion. *Journal of Mechanical Science and Technology*, *29*(8), pp. 3447–3457. https://doi.org/10.1007/s12206-015-0743-4.

10. Shestakov, N. A. (1998). *Energeticheskie metody rascheta protsessov obrabotki metallov davleniem [Energy methods for calculating the processes of metal forming].* MHYU.

11. Hrudkina, N. S., Aliieva, L. I. (2020). Modeling of cold extrusion processes using kinematic trapezoidal modules. *FME Transactions*, *48*(2), pp. 357-363. DOI: 10.5937/fme2002357H.

12. Aliieva, L., Hrudkina, N., Aliiev, I., Zhbankov, I., Markov, O. (2020). Effect of the tool geometry on the force mode of the combined radial-direct extrusion with compression. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, *2/1*(104), pp. 15–22. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.198433.

13. Hrudkina, N., Aliieva, L., Markov, O., Kartamyshev, D., Shevtsov, S., Kuznetsov, M. (2020). Modeling the process of radial-direct extrusion with expansion using a triangular kinematic module. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, *3/1*(105), pp. 17–22. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.203989.

14. Hrudkina, N., Aliieva, L., Abhari, P., Markov, O., Sukhovirska, L. (2019). Investigating the process of shrinkage depression formation at the combined radial-backward extrusion of parts with a flange. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, *2*(5/1(101)), pp. 49–57. https://doi:10.15587/1729-4061.2019.179232.

UDC 621.777.01

Natalia Hrudkina, Oleg Markov

MATHEMATICAL SIMULATION OF COLD EXTRUSION PROCESSES WITH COMPLEX TOOL CONFIGURATION

Urgency of the research. *Cold extrusion processes provide a high surface quality and precise dimensions of stamped workpieces and parts, and thus demonstrate a steady trend to expansion of technological capabilities and implementation in manufacturing. Obtaining of engineering formulas for calculating of the optimal power mode, presenting about characteristic zones and boundaries of the metal flow and contact zones of the part with deformation tool, predicting of shape formation are urgent tasks that need to solve.*

Target setting. *It is advisable to produce parts of complex shape from solid or hollow workpieces by methods of transverse and combined radial-longitudinal extrusion. In this case, the configuration of the tool (the presence of chamfers and roundings) allows to form the required profile of the part and significantly affects on the deformation and power modes of the deformation. Determination of the optimal power mode in the form of engineering formulas, taking into account the influence of design features of the tool, will contribute to a more active implementation of these processes in the manufacturing.*

Actual scientific researches and issues analysis*. Based on the analysis of publications in recent years, it has been established that studies of the processes of cold longitudinal-transverse extrusion are mainly carried out by experimental and by the finite element method and relate to the determination of the power regime, the features of the shape resizing and defect formation of the workpiece.*

Uninvestigated parts of general matters defining. *Obtaining of the engineering formulas for calculating the power regime (especially for the complex tool shape) remain unresolved, which indicates the insufficient suitability of the obtained results for using in the production.*

The research objective *is an expanding of the technological capabilities of the cold extrusion processes based on the development of new kinematic modules with complex shape and the development of appropriate recommendations for their using to obtain an assessment of the deformation force mode and determine of optimal tool configuration.*

The statement of basic materials. *The paper proposes the using of an approximate curve as a replacement for a quarter of a circle reflecting of the matrix rounding. It has been found that the deviation of the arc length of the approximate curve and the area of the curved trapezoid bounded by it does not exceed 0.8%, which indicates the adequacy of the proposed replacement. Calculations of ratio pressure into of the kinematic module with rounding have been carried out. It has been established that the radius of curvature can be used as a parameter for optimizing the configuration of the tool according to the value of the ratio pressure.*

Conclusions. *Developed new kinematic module with rounding allows to expand the capabilities of upper bound method for modeling the processes of cold extrusion with a complex tool shape. This will allow in the future to use the above calculations in new schemes and will help to obtain an assessment of the power mode and shape resizing and, as a result, to develop recommendations for the optimal configuration of the tool and more active implementation of these processes in the manufacturing.*

Keywords: *mathematical simulation, combined extrusion processes, kinematic module, upper bound method, deformation process.*

Fig.: 4. Table: 1, References: 14.

Грудкіна Наталія Сергіївна – докторант кафедри комп'ютеризованого дизайну і моделювання процесів і машин, Донбаська державна машинобудівна академія (вул. Академічна, 72, м. Краматорськ, 84313, Україна).
Hrudkina Natalia – Postdoctoral Researcher of Department of Computerized Design and Modeling of Processes and Machines, Donbass State Engineering Academy (72 Akademichna Str., 84313 Kramatorsk, Ukraine).
E-mail: vm.grudkina@ukr.net
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-0914-8875
SCOPUS: 56257651900

Марков Олег Євгенійович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютеризованого дизайну і моделювання процесів і машин, Донбаська державна машинобудівна академія (вул. Академічна, 72, м. Краматорськ, 84313, Україна).
Markov Oleg – Doctor in Technical science, Professor, Head of department of computerized design and modeling of processes and machines, Donbass State Engineering Academy (72 Akademichna Str., 84313 Kramatorsk, Ukraine).
E-mail: oleg.markov.omd@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9377-9866
SCOPUS: 55648046800

Грудкіна Н., Марков О. Математичне моделювання процесів холодного видавлювання зі складною конфігурацією інструменту. *Технічні науки та технології.* 2020. № 3 (21). С. 89-97.

UDC 62-851
DOI: 10.25140/2411-5363-2020-3(21)-98-105

Martin Varga, Filip Filakovský

DESIGN, MANUFACTURING AND PROBLEM ANALYSIS OF AN ENTIRELY FDM 3D PRINTED LINEAR PNEUMATIC ACTUATOR

Urgency of the research. *Currently, manufacturing of pneumatic components is reserved only to well-equipped manufacturing plants and machine shops. The ability to reliably manufacture pneumatic components on a FDM 3D printer would enable the creation of low-cost custom-made pneumatic actuators with novel properties. This, in turn, could increase the speed and lower the cost of development of prototypes that use pressure air as their power source.*

Target setting. *Today cost-effective 3D printers can be found both in manufacturing plants and small machine shops and hobbyist workshops. Hawing the possibility to make reliable pneumatic components like pneumatic actuators on such machines could be beneficial and lead to opening new applications for them.*

Actual scientific researches and issues analysis. *Currently most research on using additive manufacturing to construct a pneumatic actuator focuses mainly on bellows type actuators. Research on 3d printing of classical pneumatic actuators is scarce and often presents a rough overview of the design process and immediately presenting a functional prototype without focusing and studying the design hurdles thoroughly.*

Uninvestigated parts of general matters defining. *Parts for firm pneumatic actuators manufactured by FDM 3D printing exhibit properties that have detrimental effects on the optimal working of such actuators. The question is on the magnitude of these effects whether these effects can be tolerated and how to design such a firm pneumatic actuator without the need to postprocess all the components.*

The research objective. *The aim of these research was to manufacture an early prototype of full plastic 3d printed not postprocessed linear actuators and make a preliminary analysis of encountered problems therefore pointing the way for further research in this field.*

The statement of basic materials. *The analysis consists of an attempt to manufacture a simple prototype of full plastic 3d printed linear actuators without the use of postprocessing techniques and establishing a baseline for further research.*

Conclusions. *In this paper the design of three iterations of FDM 3D printed pneumatic cylinders are presented. The problems arising from not using any postprocessing on either of the parts and using only 3d printed parts for the construction is also discussed. In the final chapter the design hurdles for the design and manufacturing of such an actuator are presented..*

Keywords: *actuator; pneumatics; 3D printing.*
Fig.: 9. Table: 4. References: 7.

Introduction. Material additive manufacturing technologies, commonly referred to as 3D printing technologies have been a part of manufacturing since the 1980. In the past 20 years thanks to the increasing computing power of low-cost microcontrollers, decreasing cost of manufacturing and the expiration of many patents on 3D printing technologies, 3D printing is being more and more popular with engineers and makers alike. 3D printing technologies allow to manufacture prototypes faster and often much cheaper than using traditional manufacturing methods. Apart from that, 3D printed parts can have geometry difficult or even impossible to achieve using other methods. Currently, the cheapest form of 3D printing is FDM (fusion deposition manufacturing) 3D printing, where the lower end 3D printers are easily accessible by common people.

On the other hand, 3D printed parts, in general, suffer from coarse surface finish, anisotropy in physical properties and, depending on the technology applied, lower dimensional accuracy.

This is one reason why parts requiring smooth surface finish and dimensional accuracy are still being predominantly manufactured using standard manufacturing techniques.

One such field on which little literature can be found is 3d printing classical pneumatic and hydraulic linear actuators. Usually research focuses more on developing and using of bellows type actuators. These actuators work on the principle of a flexible airtight container. If pressure air is pumped inside of this container, the container, depending on its geometry, deforms. An example of this can be found in [1] where a soft bellows type actuator attached to rigid links and variable stiffness joints simulates a grasping finger. True firm linear pneumatic cylinder type actuators manufactured using FDM 3D printing can be found in [2] and [3] where linear actuators made using FDM 3D printing are presented. Here, some parts, namely, the piston rod, friction rings and gaskets are not made by FDM 3D printing because the authors concluded that properties

© Мартін Варга, Філіп Філаковський, 2020

not achievable by FDM 3D printing are needed. The actuator was applied to construct a pneumatic linear servo actuator and a jumping robot. In 4 a design for a completely printed single part multimaterial piston and seal assembly for a full plastic linear hydraulic micro actuator for use in medical robots is presented. In this example the 3D printing technology of PolyJet was used. In all of these examples, components that needed to have special properties, e.g. smooth surface finish, high strength etc., were either not made using 3D printing, or were postprocessed.

The question asked in this article is whether it is possible to manufacture a pneumatic cylinder using only FDM 3D printing without postprocessing any of its parts and what are the challenges that need to be overcome before such an actuator can be used in an application.

We address this question by manufacturing three complete prototypes of pneumatic cylinders and analysing the most prevalent problems encountered.

Manufacturing process. The manufacturing technology for the pneumatic cylinders was chosen to be FDM 3D printing. As mentioned above, this is the most affordable and widespread 3D printing technology, which still allows for the manufacturing of detailed and strong parts.

This technology functions by first discretising (slicing) the 3d model of the object into separate horizontal layers which are manufactured by the 3D printer on top of each other (figure 1 and 2). Each layer is in turn made from extruded plastic filament drawn across a layer and fused together to form the layer. Every layer has a spot where the start of the print path meets the end of the print path. This spot is called the seam and corresponds to a spot of decreased surface finish.

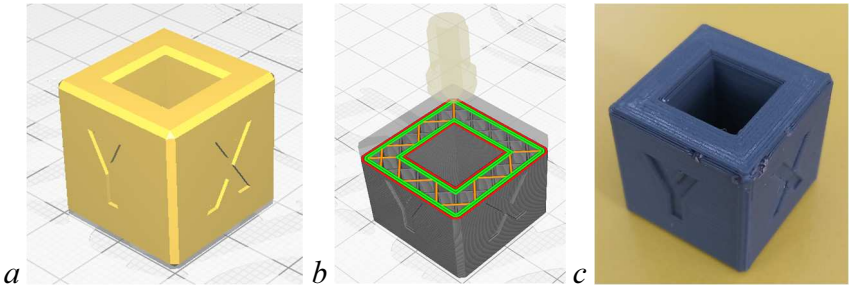


Fig. 1. Production cycle of a FDM 3D printed part:
a – 3D model; b – sliced model with toolpaths; c – finished part

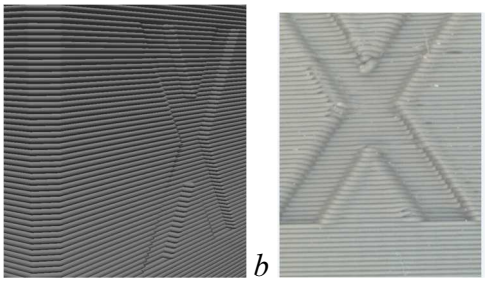


Fig. 2. Closeup on the structure of a 3D printed part:
a – theoretical a.k.a. within slicing software; b – real

As one can see from the figures above, the final part will have different tribological and strength properties along the layer lines compared to the direction normal to the layer lines. The strength of PLA parts along the layer lines according to [5] is around 50 MPa. Strength normal to the layer lines can be much lower, the difference is heavily influenced by the settings of the manufacturing process.

One other issue is that the parts manufactured using FDM 3D printing are not necessarily airtight as pores are created within the volume of the material during manufacturing (see figure 3).

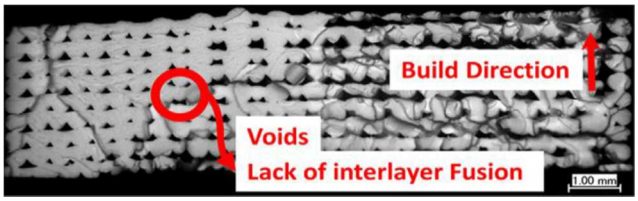


Fig. 3. Micro fractographs of 3D printed samples using FDM. Different raster orientations plays and important role in mechanical behavior of parts [7]

Basic construction of industrial grade pneumatic linear actuator. Linear pneumatic actuators are widely used, mainly in manufacturing plants. These actuators provide a good ratio of power to weight whilst being much cheaper and easier to integrate than other types linear actuators [7].

The basic construction of a linear pneumatic actuator can be seen in figure 4.

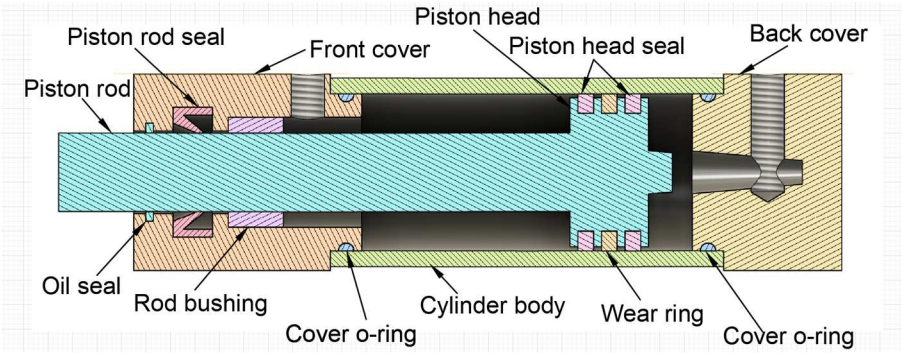


Fig. 4. Schematic sketch of a basic pneumatic linear actuator

The inner working of such an actuator is simple. Adding pressurised liquid or gas to one side of the piston head produces a pushing force acting on the piston head.

There are two sets of components in this assembly. There are the structural components: Back and front cover, cylinder body and rod bushing forming the cylinder body assembly and piston rod, piston head and wear ring forming the piston rod assembly. These provide structural integrity and eliminate unwanted degrees of freedom for movable parts of the actuator.

The other set of components are the sealing components: piston rod seal, piston head seals, oil seal and the two cover o-rings. These components provide sealing from the pressure medium leaking from one side of the piston head to the other and from inside of the actuator out, which would reduce the actuators efficiency.

One very important detail to point out is that, although the wear ring and rod bushing facilitate low friction movement for the rod assembly relative to the cylinder body assembly, these two assemblies, in ideal case, should, through the movement of the piston assembly, not touch. The piston rod assembly and actuator body assembly are connected through the piston rod seal and piston head seal. This fact can be easily seen on the commercial pneumatic linear actuator SMC CD85E10-50S-B (see figure 5) where there is noticeable play in radial direction between the piston rod assembly and cylinder body assembly.



Fig. 5. Linear pneumatic actuator SMC CD85E10-50S-B

Design and manufacturing of linear actuator prototypes. Three iterations of the pneumatic linear actuator were designed and manufactured. The basic design of the prototypes is based on the design of the SMC CD85E10-50S-B.

The design of the prototype was subjected to the following prerequisites:

a) The whole actuator including the seals is going to be 3d printed except the inlet fittings

b) The maximum pressure for testing the designs must, for safety reasons, not exceed 3bar

c) The default layer height for the structural printed parts is chosen to be 0.2 mm for faster printing

d) No surface of the actuator is going to be subjected to postprocessing and no lubrication is going to be used.

The main parameters used for0 3D printing can be found in table.1:

Table 1

Basic print settings used for manufacturing of linear pneumatic actuators

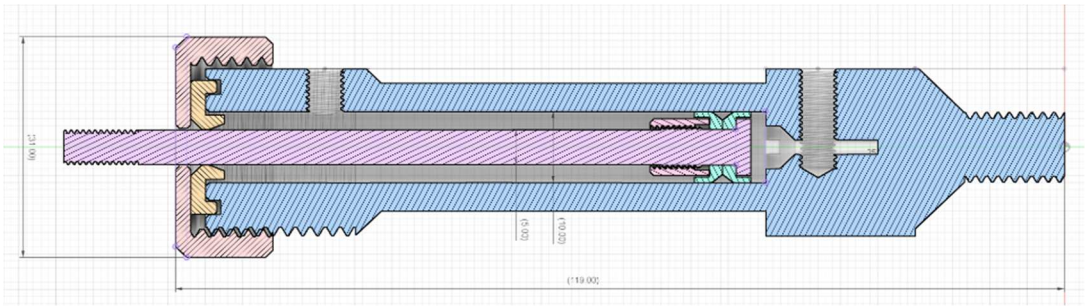
Parameter	value
Nozzle diameter	0.4mm
Layer height	0.2mm
Number of top/bottom layers	5
Perimeters	7
Extruder print temperature	205 °C
Print speed	60 mm/s
Cooling	100%

The machine used to manufacture the testing cylinder was chosen to be the Creality Ender 3. This is a very popular and cheap machine able to produce parts with satisfactory surface finish and physical properties without the need to modify the machine.

The material for manufacturing of structural components was chosen to be 3DFactory luminous red PLA and for the seals FIBER3D TPU black. These materials were on stock and are generally easily available.

Taking the basic design of an industrial grade design as a template, three consecutive iterative prototypes of linear actuators were made. Because 3D printing offers more freedom in the design of a part, the basic design of an industrial grade design was adapted to utilize the advantages and conform to the limitations of FDM 3D printing.

The cross sections of all three prototypes can be seen on figures 6 to 8.



a



b

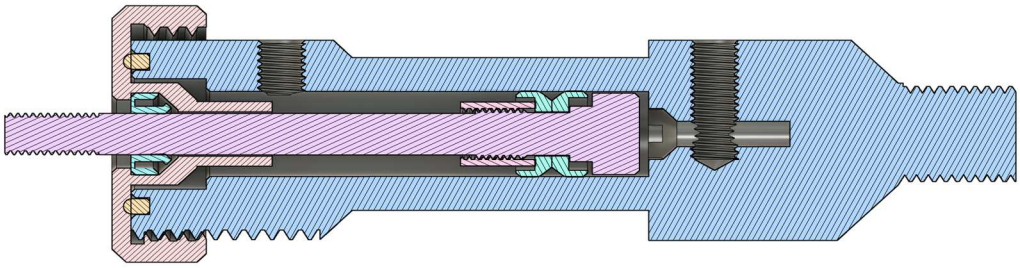
Fig. 6. First iteration of a 3D printed linear actuator (a), finished parts of the first iteration of a 3D printed linear actuator (b)

As can be seen on figure 6 the overall construction is simpler than the example cylinder. The back cover is fused with the actuator body, the front cover is a screw on cap whose front part functions as the rod bushing. There is no wear ring and the rod seal, and the front o-ring seal is also fused into a single sealing cap. The piston head seals have a cup shape and are pressed against each other by a tightening nut.

This first iteration was functional allowing the piston to extend if pressurised to 2 bars. Unfortunately, this version suffered from high amounts of pressure air leaking through both the piston rings and front sealing cap. This issue was exasperated by the missing wear ring and loose tolerances allowing the rod to move radially opening a path around the seals.

The second iteration shown on figure 7, has a redesigned front cap acting again as the rod bushing and the rod has a widened back section taking on the role of the wear ring. Also, the front cap seal and front rod seal are two separate parts now. The diameter of the front rod seals was increased to decrease pressure air blow through. The body and piston were shortened, to decrease the material and time needed for manufacturing.

The back tread of the actuator body got damaged during testing resulting in the threaded section breaking in half. This resulted in pressure air escaping through the porous material of the cylinder. Also, the increase in the diameter of the seals slightly decreased pressure air escape. Unfortunately, due to the increased contact force between the seals and the rough actuator body of the bore the piston was not able to move at 3 bar of inlet pressure.



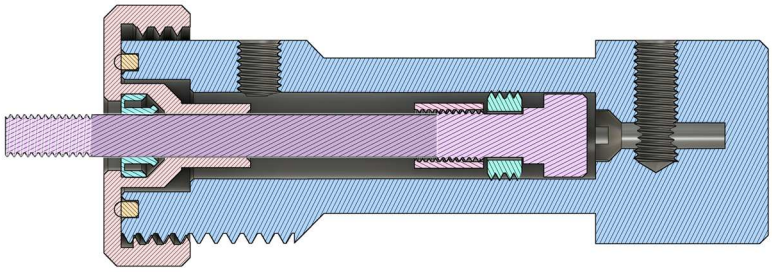
a



b

Fig. 7. Second iteration of a 3D printed linear actuator and finished parts of the second iteration of a 3D printed linear actuator

The final prototype is shown in picture 8. In this design the cylinder body was again simplified, and tolerances were adjusted. Also, a different design of the piston seal was implemented, this time using a laminar shape. The new seal design decreased the friction forces between the seal and bore, but the air leakage was audibly higher, nonetheless movement was achieved. Replacing the new piston seals with the seals from the first version showed the best results.



a



b

Fig. 8. Third iteration of a 3D printed linear actuator and Finished parts of the Third iteration of a 3D printed linear actuator

In table 2 one can see the extension force exerted by all three prototypes at a pressure of 3bar. Because the printing parameters were for all three prototypes the same, the variation of extension force is mainly due to seal design and random factors arising through the manufacturing process. The thick halfcup seal's diameter was too large leading to substantial binding through the tests and not producing reliable results.

Table 2

Extension force at 3bar

cylinder prototype no.	seal	extension force [N]	theorethical/messured force [%]
1	halfcup	13	55,1
1	thick halfcup	n/a	n/a
1	lamelar	8,8	37,3
2	halfcup	11	46,6
2	thick halfcup	n/a	n/a
2	lamelar	9,6	40,7
3	halfcup	12	50,8
3	thick halfcup	n/a	n/a
3	lamelar	9,8	41,5

The static friction forces and friction were measured for the first cylinder and for every seal (see table. 3).

Table 3

Extension force at 3bar

	static force (brake off force) [N]		
friction Ra	halfcup seal	lamelar seal	thick halfcup seal
1,136333333	10,2	1,22	40,2

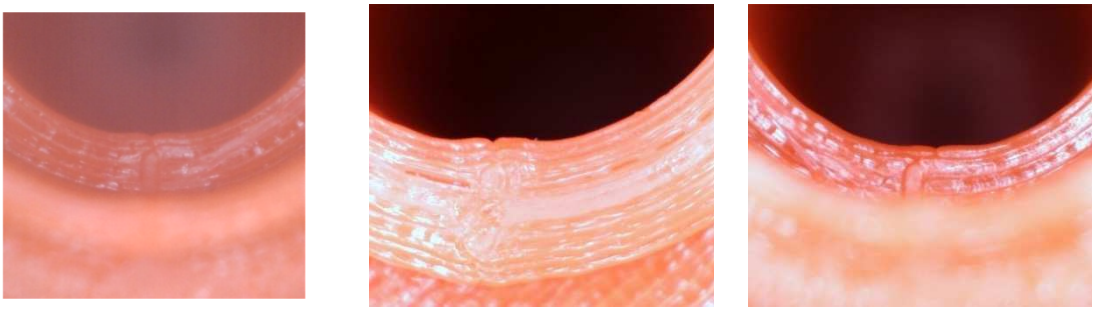
Design hurdles. As can be seen from the prototypes, there are significant hurdles to overcome in designing and manufacturing of a practical linear pneumatic actuator on a cheap desktop 3D printer. The main problems that need to be addressed are:

1. Surface friction control- surface roughness and material significantly influence the friction force between the surface cylinder body assembly and piston assembly
2. Seam quality control- the presence of a protruding seam negatively influences actuator performance (see figure 9 and table 4)
3. Tolerance control- improper dimensions of components effect seal blow through and friction forces
4. Seal design- 3D printing allows for novel seal design with unique properties
5. Material integrity control- both structural integrity at higher pressure and minimisation of pressure air escaping through the pores of the material of the cylinder need to be assured

Table 4

Seam height

Prototype no	Seam height [μm]
1	126
2	176
3	144



a *b* *c*

Fig. 9. Inner bore seam 50x magnification:
a – 1st prototype; b – 2nd prototype; c – 3rd prototype

Conclusions. In this paper the design of three prototypes of not postprocessed full plastic linear pneumatic actuators manufactured by FDM 3D printing and the topics that need to be addressed before these actuators can perform with satisfactory performance are presented. This paper is supposed to be a starting point for further research, pointing towards further work that needs to be done and giving basic information. Further topics for research can be, for example, on the ways to decrease the friction within the actuator, on reducing the negative effects of the seam on the performance of the actuator, on new seal designs, performance tests. This work will hopefully lead to the development of a new class of reliable actuators with properties only achievable using 3D printing manufacturing technologies.

Acknowledgements. This research was funded by project VEGA 1/0389/18 and project KEGA 018TUKE-4/2018.

References

1. Yang Yang, Yonghua Chen, Yingtian Li, Michael, Z. Q. Chen, Ying Wei: Bioinspired Robotic Fingers Based on Pneumatic Actuator and 3D Printing of Smart Material. *Kong, China. Soft Robotics*. Vol. 4, No. 2.

2. Christian L. Nall[1], Pranav A. Bhounsule[2]: A Miniature 3D Printed On-Off Linear Pneumatic. *Actuator and Its Demonstration into a Cartoon Character of a Hopping Lamp*. Actuators 2019, 8, 72; doi:10.3390/act8040072.

3. Jeremy Krause, Pranav Bhounsule: A 3D Printed Linear Pneumatic Actuator for Position, *Force and Impedance Control.* Actuators 2018, 7, 24; doi:10.3390/act7020024.

4. Marius Siegfarth, Tim Philipp Pusch, Antoine Pfeil, Pierre Renaud, Jan Stall Kamp: Multi-material 3D printed hydraulic actuator for medical robots. *Rapid Prototyping Journal Emerald Publishing Limited* [ISSN 1355-2546][DOI10.1108/RPJ-07-2019-0205].

5. Ionut Cosmin Oncescu: PLA 3D printed Tensile Test. *ResearchGate*, https://www.researchgate.net/publication/342317458_PLA_3D_Printed_Tensile_Test.

6. Amir M. Mirzendehdel, Behzad Rankouhi, Krishnan Suresh: Strength-Based Topology Optimization for Anisotropic Parts, 2214-8604/© 2017 Elsevier B.V.

7. Virgala, I., Kelemen, M., Prada, E., Lipták, T., Positioning of Pneumatic Actuator Using Open-Loop System, In: Applied Mechanics and Materials, Vol. 816, pp. 160 – 164, ISSN 1662-7482.

УДК 62-851

Мартін Варга, Філіп Філаковський

ПРОЄКТУВАННЯ, ВИГОТОВЛЕННЯ ТА АНАЛІЗ ПРОБЛЕМ ЛІНІЙНОГО ПНЕВМАТИЧНОГО ПРИВОДА, ПОВНІСТЮ ВИКОНАНОГО ЗА ТЕХНОЛОГІЄЮ 3D-ДРУКУ МЕТОДОМ ПОШАРОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ

Актуальність теми дослідження. *Нині виробництво пневматичних компонентів доступне тільки в добре обладнаних виробничих підприємствах і механічних цехах. Виготовлення пневматичних компонентів для 3D-принтерів, працюючих на принципі пошарового наплавлення, дасть можливість створювати низьковартісні пневматичні приводи з новітніми властивостями. Це, у свою чергу, може збільшити швидкість та знизити вартість розробки прототипів, які використовують тиск повітря як джерело живлення.*

Постановка проблеми. *Сьогодні економічні 3D-принтери можна знайти як на виробничих підприємствах, так і в невеликих механічних цехах і майстернях для любителів. Виготовлення надійних пневматичних компонентів, таких як пневматичні приводи, на даних машинах може бути вигідним і привести до відкриття нових можливостей їх застосування.*

Аналіз останніх досліджень і публікацій. *На сьогодні більшість досліджень щодо адитивного виробництва для конструювання пневматичних приводів фокусуються переважно на приводах сильфонного типу. Дослідження 3D-надрукованих класичних пневматичних приводів є недостатніми і досить часто містять лише приблизний огляд процесів проєктування та презентують функціональні прототипи без наведення та ґрунтовного вивчення конструктивних перешкод.*

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. *Компоненти фірмових пневматичних приводів, виготовлені за технологією 3D-друку методом пошарового наплавлення, проявляють властивості, які мають шкідливий вплив на оптимальну роботу таких приводів. Питання полягає в тому, чи величина цього впливу є допустимою, і яким чином спроєктувати приводи без потреби послідуючої обробки всіх компонентів.*

Постановка завдання. *Метою цих досліджень було виготовлення раннього прототипу цілком пластикових лінійних приводів, надрукованих на 3D-принтері, без послідуючої обробки, а також попередній аналіз проблем, що виникли, для пошуку шляхів подальших досліджень у цьому напрямку.*

Виклад основного матеріалу. *Стаття містить описання спроб виготовлення простого прототипу повністю пластикових лінійних приводів на 3D-принтері без використання методів послідуючої обробки та визначення підґрунтя для подальших досліджень.*

Висновки відповідно до статті. *У цій статті представлені моделі трьох ітерацій пневматичних циліндрів, надрукованих 3D-друком методом пошарового наплавлення. Обговорені проблеми, що виникають без використання жодної постобробки компонентів та при застосуванні у конструкції тільки надрукованих 3D-друком деталей. У заключній частині наведені конструктивні перешкоди для проектування та виробництва таких приводів.*

Ключові слова: *привід; пневматика; 3D-друк.*

Рис.: 9. Табл.: 4. Бібл.: 7.

Martin Varga – PhD student, Technical University of Košice, Faculty of Mechanical Engineering, Institute of Automation, Mechatronics and Robotics, Department of Mechatronics (Park Komenského 8, 042 00 Košice).
E-mail: martin.varga.2@tuke.sk
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3606-5351
ResearcherID: AAA-5078-2020

Filip Filakovský – PhD student, Technical University of Košice, Faculty of Mechanical Engineering, Institute of Automation, Mechatronics and Robotics, Department of Mechatronics (Park Komenského 8, 042 00 Košice).
E-mail: filip.filakovsky@tuke.sk

Varga, M., Filakovský, F. (2020). Design, manufacturing and problem analysis of an entirely FDM 3D printed linear pneumatic actuator. *Technical sciences and technologies,* 3(21), pp. 98-105.

UDC 621.865.8
DOI: 10.25140/2411-5363-2020-3(21)-106-111

Rudolf Jánoš

MODELLING OF ROBOT MANIPULATION IN INTEGRATED PRODUCTION

Urgency of the research. *Cell production has become one of the most important studies of the arrangement of production systems. This production philosophy is based on the fact that the products are similar in shape and production processes. This allows parts to be grouped into groups that they share during their processing, ensuring an economic effect.*

Target setting. *Automated production systems are built with large investments. The result is small-scale production automation cells, including industrial robots, including handling automation. These automation islands did not meet expectations in terms of costs, commissioning dates, meeting production deadlines, achieving planned performances, so attention must be paid to integrated production.*

Actual scientific researches and issues analysis. *Integrated production reduces material handling and transport time. By making the product more time on the machinery and less time on the road. Because the parts move in the chamber and not in the entire factory, travel time and distance are reduced, leading to a reduction in material handling costs, which represents between 20 and 50 % of the total operating costs.*

Uninvestigated parts of general matters defining. *Most articles and other publications on the problem of modeling integrated manufacturing alleviate the problem of modeling a specific cell. In my article I will solve a production cell in general without specific properties.*

The research objective *This paper focuses on the integrated and logistic of the style of material flow, suitable for realization manufacturing and logistics network. Solution base is defining of mission, objectives and goal integrated of the style of material flow. The core of solution is analysis of strategy on integrated. The result of solution is to define tools integrated and formation evolution profile of the style of material flow.*

The statement of basic materials. *In general, the key to building integrated production is group technology based on the principle of material flow analysis. The problem of modeling integrated production points to possible variants of solutions based on the analysis of material flows. However, considering only this criterion is insufficient for practice, because it does not consider e.g. about the number of pieces.*

Conclusions. *These relationships are representative of some approaching the importance of parameterization, which remains open and accessible to address other tasks to optimize the production system.*

Keywords: *material flow; manipulation technical; integrated functions.*
Fig.: 4. Table: 1. References: 13.

Introduction. Development of automation assembly systems makes the question of efficiency and optimization, which can be addressed with regard to external conditions and internal conditions. One of the determining factors is the automation of manipulating and flexibility of material flows that are important in adapting manufacturing systems for large-scale changes in market quality and reducing production costs. The requirements of flexibility and quality production, low implementation costs lead to the creation of expediency handling equipment and structures based on nature of phenomena associated with the implementation of functions and activities [2].

For this purpose, to accede to the development of manipulating systems perspective as a basis for the creation of flexible material flows. These are being diverted away from graphical, analytical and parametric models and then used to design effective and efficient elements, equipment manipulating and ensembles [1; 3].

Model of integrated production. Addressing integrated handling due to the fact that the function of the material handling time and the number required to provide a process or department material producing devices as well as time to settle differences and inequalities, which have created in integrate technology operations in a coherent process [10].

For medium-sized enterprises in manufacturing structures for small series as well as large enterprises with a variety of simple tasks in the handling of workpieces is under considerable pressure to reduce production costs by all means and purposeful automation. For these areas it is advisable to develop an integrated material flow solutions. Flexible automated handling the machine and automatic supply of individual production cells are still scarce. Towards an integrated manufacturing system automation modules are still missing. Even in exceptional cases specifically addressing the use of automation of handling general fail and the concatenation of certain types of components and the high costs incurred in individual solutions. Only by developing the production-transmission systems, and in particular concatenation of grouping of workpieces can create cost-effective systems that meet the established requirements [4].

© Рудольф Янош, 2020

The strategic objective is to achieve a more comprehensive application of automation engineering and manufacturing into one compact unit production logistics chain- Fig.1. profiling under the integrated material flow. This trend makes the deployment of advanced concepts of the transport storage and handling systems that ensure a high degree of automation and modularity. Handling, transport and storage technology is indispensable for those goals, but far from forming an integrated system. Equally important is a well-organized flow of material. While the system applies the principle of integration objects to avoid unnecessary handling operations, respectively to be easily automated. The rational is needed to automate operations such level of integration to secure the required handling functions and to avoid duplication and thus unorganized production [5].

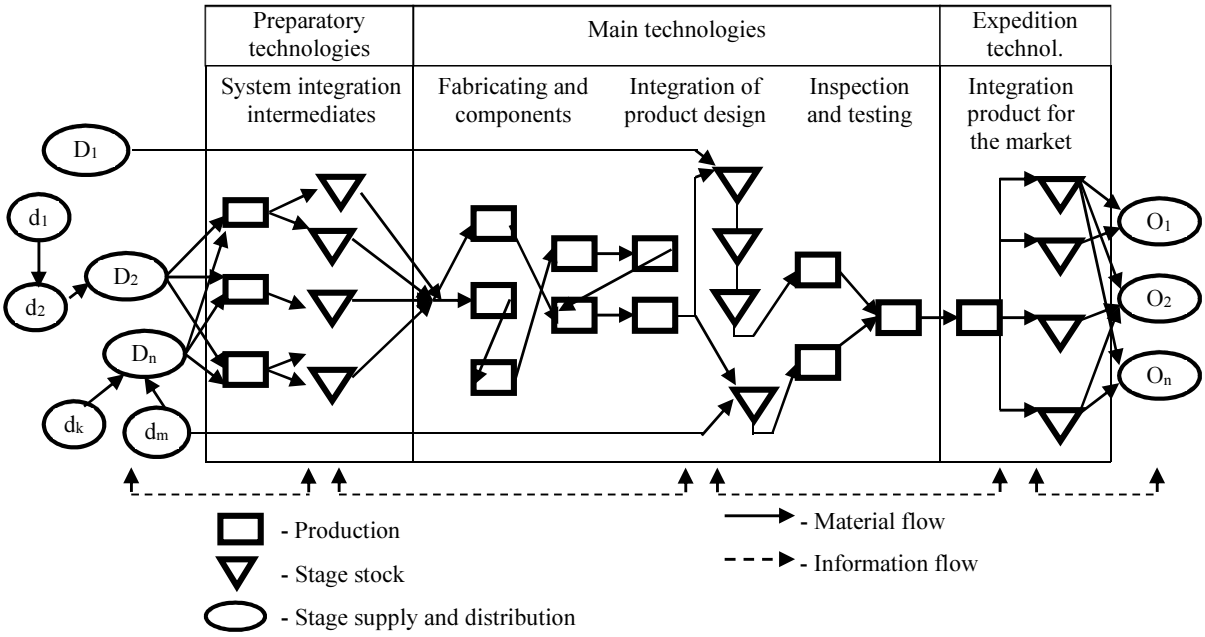


Fig. 1. Production logistics chain

Creating an integrated handling system, and hence more real integrated production and assembly is, undoubtedly, the systemic nature of the creative question. This leads to the search for answers on how to create complex technical systems, which currently require only a significant increase in the level of automation, but also the design of appropriate means of forming system [2].

Description of the solution. In modelling and parameterization tasks, automated handling assuming availability of exact methods of system analysis, in methods for the registration system using a formal mathematical apparatus. Mathematical modelling is one tool in addressing the tasks of analysis, design and management of handling systems, which have a material effect on its efficiency. It is an abstraction model that is based on the allocation and modelling of critical information, material and physical communication in circulation (Fig. 2) [6].

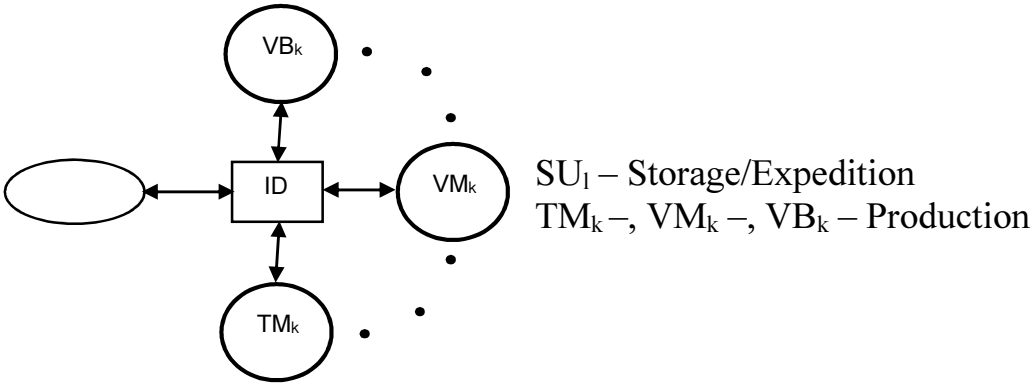


Fig. 2. Form integrated production system

Modeling. Creating the material flow logistics solutions precedes the description of communication material and registration material communications network, describing the track mounting system. Based on the decomposition of the manufacturing system of an indirect link between the storage node-handling hub-production unit with its own handling equipment. For a description of the material define the communication nodes (marking O), and ". joining the (sign ---). Depending on the status and role of the studied functions handling system varies the number of nodes, their state and mutual relations. Therefore, the model must represent the communication material such registration, to determine the starting node (U1), the target node (U_n) and Centre knots (U_2, ..., U_{n-1}). Then material communication network is the sum of flows in all the roads leading from node U1 to node Un. If the communication system of the material in any sub- U_1, U_2, ... U_n, defined as a structure of nodes U_1 (u_{11}, u_{12} ,..., u_{1m}), U_2 (u_{21}, u_{22}, ..., u_{2m}), U_n (u_{n1}, u_{n2}, ..., u_{nm}), Fig.3 then analyze the material flow system for the distinctive level nodes u_{ij} (operations, buffer), at nodes U_1, U_2, ..., U_n (central), or U level (operational, interoperable, central), Fig.4. [8]

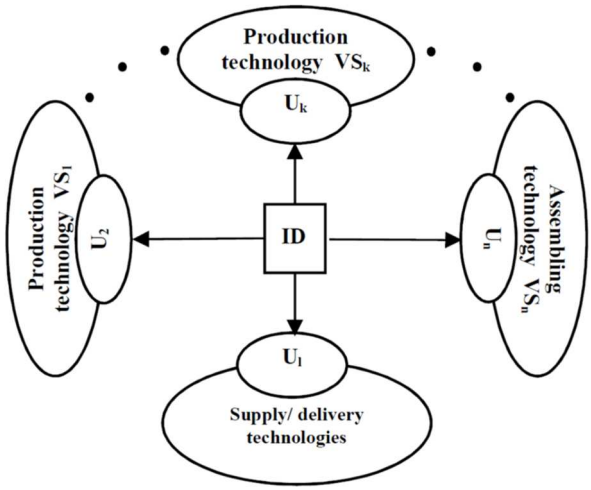


Fig. 3. Description of communication material – central level

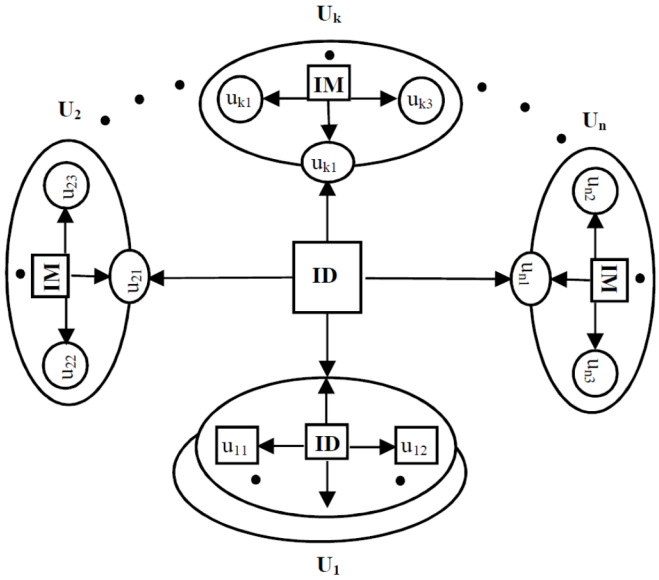


Fig. 4. Description of communication material – operational level

Where U_1 input-output store;

U_2,...,U_n – manufacturing/ assembly cells;

u_{ij} – technology/ storage space.

Writing a network of communication between the base material, the target node and the centre nodes can be transferred using the incident matrix and graph-oriented material flow [7].

Parameterization. The communication system can be blamed for the material type and position of individual nodes, the number of input and output material flow, the maximum vertical connection with the node creating the material pattern, the presence of loops and the occurrence of isolated node [9].

These methods of modelling material communications are limited to standard types of distribution operations, which characterize the intervals between arrivals and time requirements of handling a relatively simple structure of network communications material and simple rules for the operation. Cover wider ties information, material and physical communication is configurable options in material flow through the so-called the transport matrix, table.

Table

The transport matrix material flow

OD/DO	**U_1**	**U_2**	**U_k**	**U_n**
U_1		$\frac{X_{12}}{Y_{12}} a_{12}$	$\frac{X_{13}}{Y_{13}} a_{13}$	$\frac{X_{14}}{Y_{14}} a_{14}$
U_2	$\frac{X_{21}}{Y_{21}} a_{21}$		$\frac{X_{23}}{Y_{23}} a_{23}$	$\frac{X_{24}}{Y_{24}} a_{24}$
U_k	$\frac{X_{31}}{Y_{31}} a_{31}$	$\frac{X_{32}}{Y_{32}} a_{32}$		$\frac{X_{34}}{Y_{34}} a_{34}$
U_n	$\frac{X_{41}}{Y_{41}} a_{41}$	$\frac{X_{42}}{Y_{42}} a_{42}$	$\frac{X_{43}}{Y_{43}} a_{43}$	

Where X_{ij} – the number of objects (handling units);

Y_{ij} – distance respectively transit time between nodes;

a_{ij} – continuity operations and activities between the production and storage sites.

Rows respectively columns represent different points of the network once communication material, and the transition from one point to the second point is represented by the matrix element, whose index is the line end point (where), and a member of itself contains a value which is given by elements x, y, a. Parameterization problem can be further used to determine the number of transport and handling units and the organization handling the arrangements [13].

In determining the number of vehicles (ID) and manipulation (IM) units of the production system based on: the relationship (1) if it is the flow of materials between storage nodes and production units in direct custody or between nodes and storage nodes handling of individual production cells with indirect link (central level).

$$ID = \frac{X_{ij} \cdot Y_{ij}}{60 \cdot p \cdot s \cdot \eta} \quad (1)$$

Where X_{ij} – the number of objects (handling units) transported per hour;

Y_{ij} – transit time between nodes [min];

p – the number of pallets in the transport dose;

s – the number of components in the palette;

η – access toη transport units in the system.

These relationships are representative of some approaching the importance of parameterization, which remains open and accessible to address other tasks to optimize the production system [12].

Conclusions. These relationships are representative of some approaching the importance of parameterization, which remains open and accessible to address other tasks to optimize the production system.

Acknowledgement. This article was created thanks to the KEGA project support: 010TUKE-4/2020 - Implementation of new knowledge and innovative approaches to the process of teaching robotics in line with Industry 4.

References

1. Arsovski, S.; Arsovski, Z.; Mirovic, Z. (2009). The integrating role of simulation in modern manufacturing planning and scheduling. *Strojniski Vestnik/Journal of Mechanical Engineering*, 55(1), pp. 33-44.

2. Swic, A., Mazurek, L. (2011). Modeling the reliability and efficiency of flexible synchronous production line. *Eksploatacja i Niezawodnosc-Maintenance and Reliability*, 4(52), pp. 41–48.

3. Božek, P. (2013). Robot path optimization for spot welding applications in automotive industry [Optimiziranje putanje robota kod točkastog zavarivanja u industriji motornih vozila]. *Tehnicki Vjesnik*, 20(5), pp. 913-917.

4. Bubeník, P., Horák, F. (2014). Knowledge-based systems to support production planning [Sustavi temeljeni na znanju kao podrška planiranju proizvodnje]. *Tehnicki Vjesnik*, 21(3), pp. 505-509.

5. Gola A., Swic A. (2011). Computer aided machine tool selection for focused flexibility manufacturing systems using economical criteria. *Actual Problems of Economics*, 10(124), pp. 383-389.

6. Lehocká, D., Hlavatý, I., Hloch, S. (2016). Rationalization of material flow in production of semitrailer frame for automotive industry [Racionalizacija toka materijala u proizvodnji polu-okvira za automobilsku industriju]. *Tehnicki Vjesnik*, 23(4), pp. 1215-1220.

7. Srinivasan, M., Moon, Y. (1997). A framework for a goal-driven approach to group technology. Int. I.Production Research, 35.

8. Sudhakara Pandian, R., Mahapra, S. S. (2004). Manufacturing cell formation with production data using neural networks. Computers&Industrial Engineering, 2009. Aguilar, S.: Playing it safe with robotic welding, Practical Welding Today.

9. Gamboa, J. (2008). Intelligent Manufacturing Systems: a methodology for technological migration. Procceding of the World Congress on Engineering.

10. Hajduk, M., Šiovič, P. (1996). Profilation of Multicells Manufacturing Systems. CIM 96, Zakopane.

11. Hajduk, M., Klobušická, M., Šovič, P. (jún 2000). Nový pohľad na princípy skupinovej technológie pri profilácii pružných výrobných buniek. In. Medzinárodná konferencia Nové smery vo výrobných technológiách, Prešov.

12. Tisley, R., Lewis, F. A. (1977). Flexible cell production systems a realistic approach. In. *CIRP*, 25(1).

13. Tolnay, M., and coll. (2005). Structurated database of the manipulation transportion facilities for virtual enterprise. *18-th International conference on production research.*

УДК 621.865.8

Рудольф Янош

МОДЕЛЮВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНИХ ОПЕРАЦІЙ В ІНТЕГРОВАНОМУ ВИРОБНИЦТВІ

Актуальність теми дослідження. *Групове виробництво стало одним з найважливіших напрямків в організації виробничих систем. Ця філософія виробництва грунтується на схожесті виробів за формою та виробничими процесами. Це дозволяє згрупувати деталі в групи, за якими вони діляться під час їх обробки, забезпечуючи економічний ефект.*

Постановка проблеми. *В автоматизовані виробничі системи вкладають великі інвестиції. Результатом є невеликі ділянки автоматизованого виробництва, включаючи промислові роботи, а також автоматизацію переміщення. Ці автоматизовані ділянки не виправдали очікувань щодо затрат, строків введення в експлуатацію, дотримання строків виробництва, досягнення запланованих показників, тому необхідно приділити увагу інтегрованому виробництву.*

Аналіз останніх досліджень і публікацій. *Інтегроване виробництво скорочує час на обробку та транспортування. Завдяки тому, що виріб більше часу знаходиться на обладнанні та менше часу витрачається на транспортування. Оскільки деталі переміщають по ділянці, а не по всьому виробництву, час та довжина переміщень скорочуються, що призводить до зниження затрат на вантажно-розвантажувальні роботи, які становлять від 20 до 50 % від загальних експлуатаційних витрат.*

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. *В багатьох статтях та інших публікаціях з проблеми моделювання інтегрованого виробництва розглядається проблема моделювання конкретної групи. У цій статті розглянуто моделювання інтегрованого виробництва загалом.*

Постановка завдання*. Ця стаття зосереджена на інтегрованому та логістичному напрямках матеріального потоку, придатному для реалізації виробничої та логістичної мережі. Основа рішення – у визначенні міссії, цілей та задач. Інтегрованих в напрямок матеріального потоку. Сутністю рішення є аналіз стратегії інтеграції. Визначено завдання, а також зроблено аналіз стратегії інтеграції. Результатом є визначення інструментів інтеграції та формування шляхів удосконалення напрямків матеріального потоку.*

Виклад основного матеріалу*. Загалом, ключем до побудови інтегрованого виробництва є групова технологія, заснована на принципі аналізу потоку матеріалів. Проблема моделювання інтегрованого виробництва вказує на можливі варіанти рішень, заснованих на аналізі матеріальних потоків. Проте врахування лише цього критерію недостатньо для практики, оскільки він не враховує наприклад кількість виробів, що виготовляються.*

Висновок відповідно до статті*. Ці взаємозв'язки демонструють в деякому наближенні важливість параметризації, яка залишається відкритою та придатною для вирішення інших задач з оптимізації виробничої системи.*

Ключові слова: *матеріальний потік; керування виробничим процесом; інтегровані функції.*

Рис.: 4. Табл.: 1. Бібл.: 13.

Jánoš Rudolf - Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Technical University of Kosice, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Robotics (Komenskeho Park 8, 042 00 Kosice, Slovakia).
E-mail: rudolf.janos@tuke.sk
Scopus Author ID: 55016528600

Jánoš, R. (2020). Modelling of robot manipulation in integrated production. *Technical sciences and technologies*, *3*(21), pp. 106-111.

UDC 621.8
DOI: 10.25140/2411-5363-2020-3(21)-112-119

Semjon Jan, Martin Fufal, Martin Kocan

DESIGN OF THE HANDLING PROCESS AT THE WORKPLACE WITH ABB ROBOT AND MODULAR CONVEYOR

Urgency of the research. *The use of robotic Pick & Place operations in industry is currently gaining in importance due to increasing productivity in the workplace. Deployment of such robotic workplaces in the food industry, where it is necessary to handle a large number of products, allows to maintain the competitiveness of the producers of these products. The ability to carry out demonstrations and trainings at workplaces that are not directly part of production allows students and workers to try out these processes without the need to shut down production.*

Target setting. *The aim is to design a functional workplace, whose task will be to implement demonstrations of work in a robotic workplace. The designed workplace will also serve in the educational process, where students will have the opportunity to improve their knowledge in programming Pick & Place tasks using a parallel robot. At the same time, students will be able to program the logic of pallet movement on a modular conveyor and synchronize this movement with the robot's movement.*

Actual scientific researches and issues analysis. *Automation or robotization would not be possible without the use of modern conveyor systems. Therefore, it is necessary to constantly try to modify the currently used systems so as to increase their productivity while maintaining the required quality. This can be achieved not only by optimizing processes, but also by using modern modular conveyor systems.*

Uninvestigated parts of general matters defining. *Increasing the competence of employees and students in the programming of robotic workplaces improves their application on the labour market. This cannot be achieved only by theoretical preparation, it is necessary to have real training workplaces equipped with appropriate technology.*

The research objective. *The aim was to design such a robotic workplace where it will be possible to increase the potential of employees or students and develop their creative thinking. The use of the proposed objects for manipulation has only a demonstration task and assumes that students will come up with their own design solution to the given problem during the training process.*

The statement of basic materials. *Deployment of parallel robots in various operations has an ever-increasing trend. The preparation of suitable workers for the optimal use of such robotic workplaces is therefore also important due to the transition to Industry 4.0.*

Conclusions. *The article describes the modification of a modular conveyor for the needs of a robotic workplace equipped with a parallel robot. The workplace is equipped with an IRB 360/3 - 1130 robot, a Bosch modular conveyor equipped with pallets and a belt conveyor of its own production. The parallel robot is equipped with a suction cup enabling the removal of parts weighing up to 300 g. The proposed handling process envisages the transfer of cube-shaped parts from a modular conveyor to a belt conveyor. When designing the workplace, it was necessary to replace the damaged control unit in the modular conveyor, equip the conveyor with a system of additional sensors and program the workplace. The proposed workplace will serve as a demonstration workplace on the university, as well as for training students in programming robots and a modular conveyor.*

Keywords: *robot; programming; conveyor; palette.*
Fig.: 9. Table: 1. References: 8.

Problem definition. The trend of robotics (automation in general) is the cause of ever-increasing demands for increasing production and production quality. There are many manufacturers on the market with a rich history who deal with the issue of robotics and offer a full range of industrial robots designed for different types of tasks. Robotic workplaces often use parallel (delta) robots to quickly pick up smaller products and organize them (Picking and Placing). Despite the relatively simple design, they can work with high speed, acceleration and accuracy [1, 2]. The aim of the article is to design a handling process for the Delta robot ABB IRB 360 FlexPicker using a modular conveyor belt and at the same time to design a reconstruction of this conveyor for the successful execution of the process.

The idea to create a new robot was created in the late 1980s by Swiss professor Reymond Clavel and his team from the Laboratory of Robotic Systems at the Ecole Polytechnique Federale de Lausanne (EPFL). Professor Clavel was looking for repetitive robot jobs, and after visiting a chocolate praline factory, they discovered that chocolate praline packaging was a candidate for this type of high-speed, low-payload automation. There were also few robots on the market that could quickly and repeatedly perform Pick & Place tasks. The professors' team began to set restrictions on the design of the robot. First, the robot had to perform up to 3 operations per second. For the correct placement of the chocolate, the mobility of the robot required 4 degrees of freedom: translation along 3 axes, as well as rotation around the vertical axis. To achieve a high level of productivity, Clavel designed to position the motors and all robot controls so that they are attached to the frame and make the moving part of the robot as

© Семйон Ян, Фуфал Мартін, Кочан Мартін, 2020

easy as possible. This mechanism led to the creation of a robot with a delta structure [3]. Little did anyone know that at the turn of the century, this mechanism would be used as one of the most successful parallel mechanisms with several hundred active robots around the world.

Current status in workplace. ABB Flexible Automation started manufacturing delta robots in 1999 under the name IRB 340 FlexPicker. This type of robot was primarily to be used in three industries - the food, pharmaceutical and electronics industries.

There is an industrial robot IRB 360-3 / 1130 at the workplace, Fig. 1 equipped with suction cups, a Bosch modular conveyor and a self-made belt conveyor.

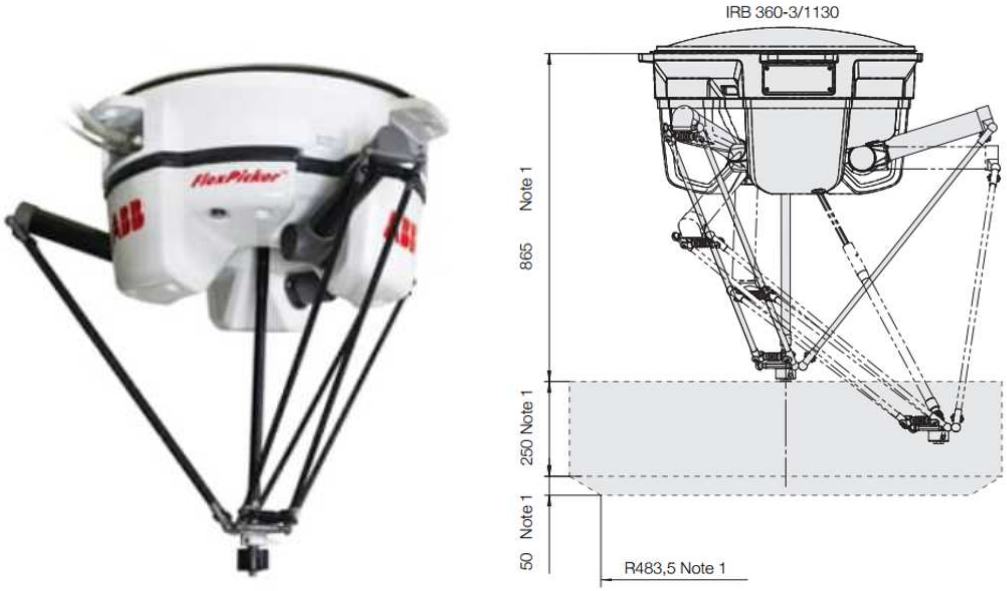


Fig. 1. Robot ABB IRB 360

The IRB 360 robot group includes variants with a load capacity of 1 kg, 3 kg, 6 kg and 8 kg and with a reach of 800 mm, 1,130 mm and 1,600 mm - which means that the IRB 360 is available for versatile use depending on the required requirements. Thanks to good motion control, short cycle times and high accuracy, the IRB 360 can work with small tolerances at very high speeds, whether in narrow or wider spaces [4]. Each FlexPicker also has a sophisticated tool flange that allows the use of a larger gripper and thus achieves higher speed when handling continuously packaged products from a moving belt. The parameters of the robot are given in Table.

Table

ABB robot parameters [5]

Weight	120 kg
Payload	3 kg
Working range	1130 mm
Cycle times	0.52 s
Repeatability	+/- 0.1 mm

Modular pallet conveyor (TS1) is part of a larger family of TS (Transfer Systems) from Bosch Rexroth, which also includes TS plus and TS4 plus [5]. Like all TS products, the TS 1 is a non-synchronous conveyor based on the movement of pallets carrying workpieces, which is designed to increase production productivity, time efficiency and at the same time allows flexibility in assembly. All TS 1 components are pre-prepared and modular. This means that additional modules can be combined or added as required. The system can be easily changed, reconfigured or relocated as needed. As production requirements change, TS 1 provides the flexibility to add manual or automatic workstations. Popularity also simplifies system design and installation. As

a result, it can better respond to changing task requirements. Installation and maintenance are also simple [6]. At the workplace in the TUKE laboratory, a parallel conveyor was used, the model of which is shown in Fig. 2. The dimensions of the conveyor are 3500×600×900 mm.

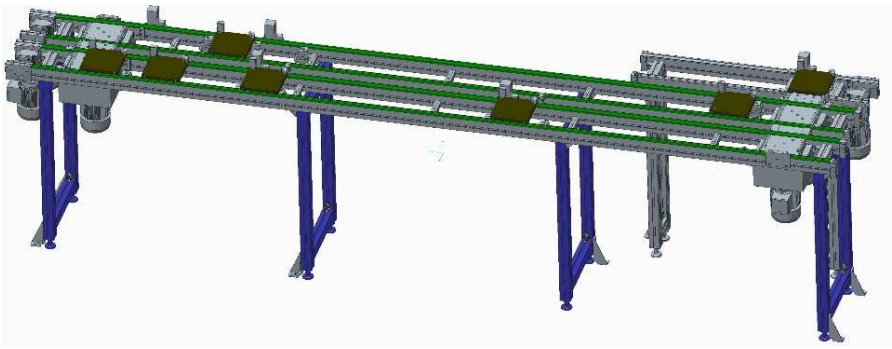


Fig. 2. Modular conveyor

TS 1 conveyors transport parts on pallets of workpieces. Workpiece pallets travel on conveyor conveyor belts. The pallets can be stopped at the front or rear edge - regardless of the orientation of the pallet on the conveyor. Pallets can also be stacked in a queue and released one at a time. The size of the pallet is 160×160 mm and the load capacity is 3 kg.

The belt conveyor has dimensions of 2015×550×900 mm. The width of the belt is 300 mm

Proposal of robotized workplace. The modular conveyor used at the workplace in the KVTaR SjF TUKE laboratory must undergo several modifications in order to be suitable for use in the proposed handling process. Priority must be given to replacing the non-functional original PLC responsible for the conveyor logic. Subsequently, the conveyor must be equipped with sensors and pneumatic stop gates to a predetermined location and connected correctly. The original Siemens S7 / 300 automatic machine, which was responsible for the control of the conveyor belt, is inoperative and therefore needs to be replaced. The same PLC model (S7 / 300) is used as a substitute [7]. Replacing the PLC is very important, because the PLC will be responsible in the handling process for the complete control of the conveyor and also for sending signals to the control system of the IRC5 robot. These signals allow the IRB 360 robot to be started and manipulated.

The design of the conveyor conversion must be further extended to include inductive sensors. The first task that these sensors will perform is to identify the pallet with the product before the place of gripping the product and subsequent handling, Fig. 3a. This sensor will trigger the stop gate. The pneumatic stop gate stops the pallet with the product under the place of handling, thus preventing its movement, Fig. 3b. The robot can then grab the product and move it. After the product is picked up by the robot, the stop gate is deactivated and the empty pallet continues on its way, Fig. 3c. The sensor and the corresponding stop gate thus wait for the next cycle with the pallet and the product.

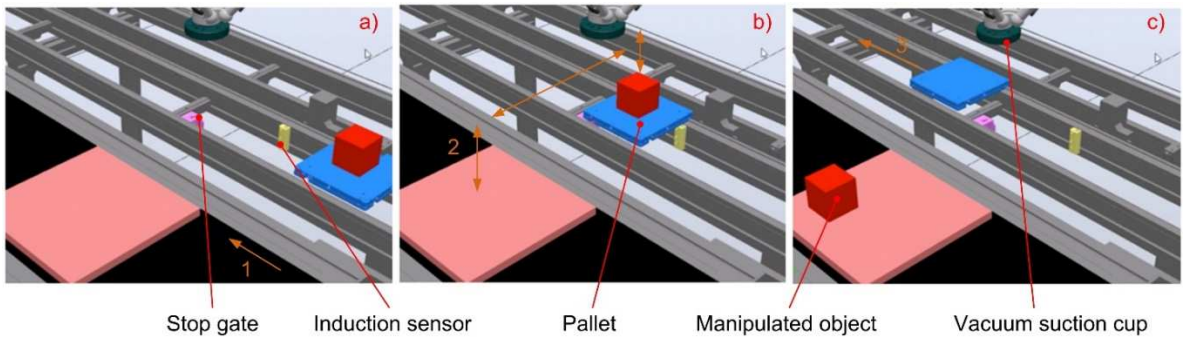


Fig. 3. Manipulation process

The first stop gate located in front of the cross conveyor is deactivated after the start of the process, thus allowing the movement of the first pallet with the product. The following sensor is responsible for activating the stroke of the cross conveyor, during which the pallet is raised and thus allows the pallet to be moved between the two paths, Fig. 4a. The lifting takes place after a time delay which allows the pallet to reach the guide tracks of the cross conveyor. After moving the pallet to the desired position, the stroke of the transverse conveyor is deactivated and the pallet thus reaches the path of the longitudinal conveyor, along which it starts to move, Fig. 4b. The following sensor, which has detected a pallet that has passed through the cross conveyor, deactivates the stop gate preventing the pallet from moving in front of the cross conveyor, Fig. 4c. This will allow the next pallet to move and cross the cross conveyor.

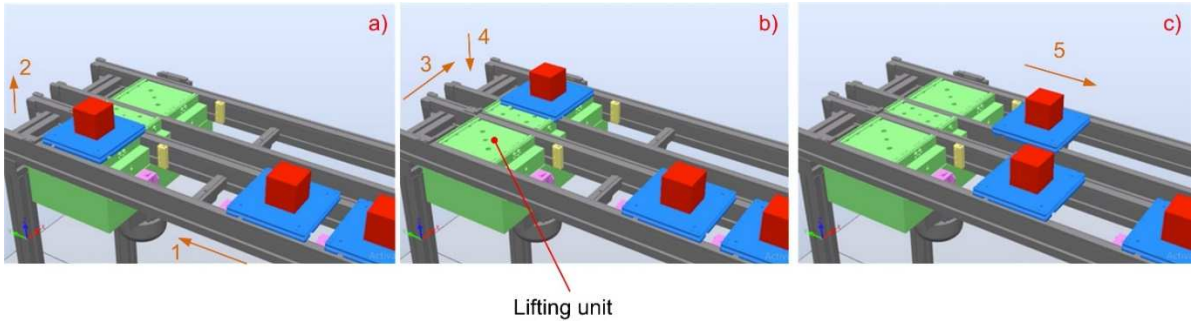


Fig. 4. Moving pallets between two conveyors

Based on the analysis of the possibility of solving the movement of pallets on the conveyor, the Pick & Place process was designed on a robotic workplace. The design was implemented in the ABB Robot Studio environment. In the initial position, the stops are activated, which hold 4 pallets, while the initial position of the pallets and the products located on them is shown in Fig. 5a. The process begins with the start of the drives of the longitudinal and transverse conveyors. Then the whole process starts, using Flexpendant (we start the program). The pallets are gradually moved through the transverse conveyor under the place of handling, where the robot moves the product located on the pallet and places it in a predetermined position, Fig. 5b.

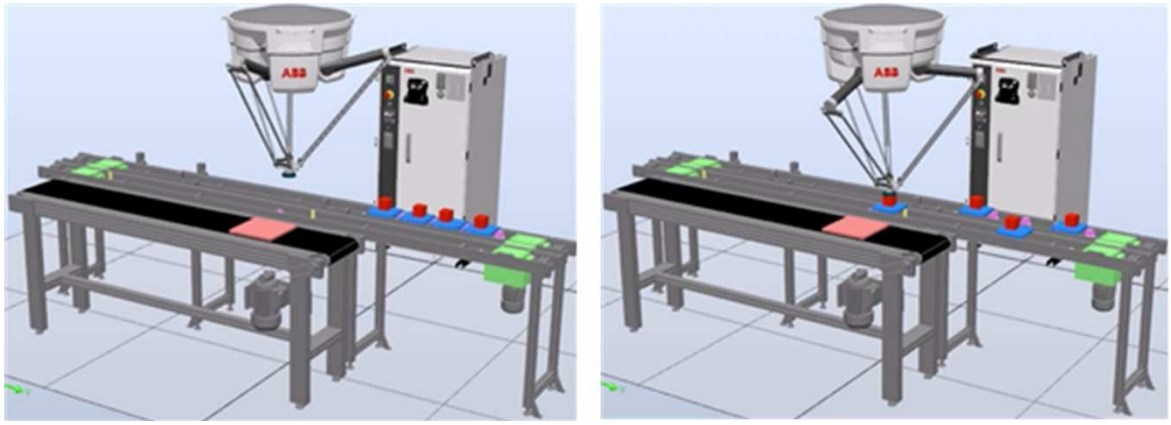


Fig. 5. Start of the Pick & Place process

After moving the product with the effector to the specified position, the stop gate is deactivated, allowing the empty pallet to move. The empty pallet approaches the second cross conveyor, where it is captured by a sensor and activates the process of moving the pallet through the second cross conveyor, Fig. 6a.

This procedure is performed a total of 4 times for each product pallet. Each product has its own designated place, where it will be stored, Fig. 6b and the empty pallets gradually return to their original positions from where they began their movement at the beginning of the cycle.

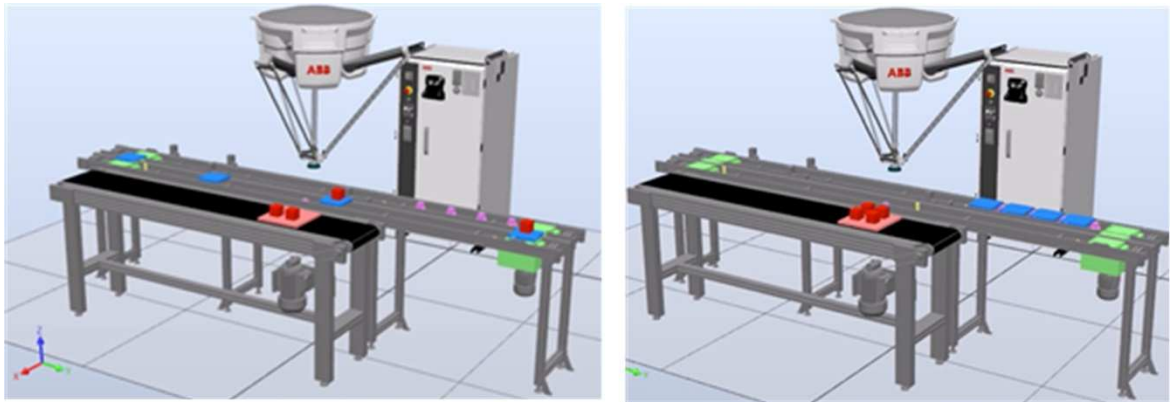


Fig. 6. End of the Pick & Place process

The robot places the products on a pad, which is placed on a belt conveyor. This conveyor is not included in the handling process, but clearly presents the possibility of incorporating this handling process into larger production processes. The process diagram is shown in Fig. 7.

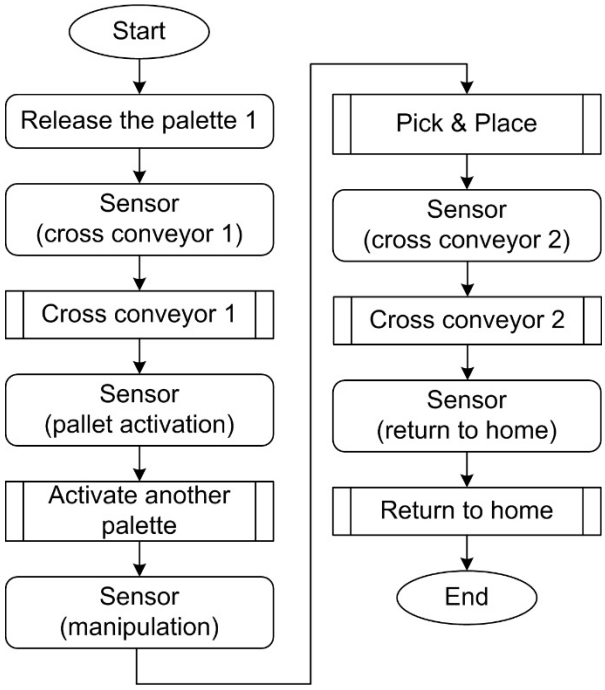


Fig. 7. Scheme of the proposed process

After starting the product, the first palette is released, the movement of which activates the "Sensor" triggering the process (Cross conveyor 1). This process moves the pallet from one longitudinal conveyor to another. After moving the pallet over the cross conveyor, the pallet starts moving along the guide paths of the second longitudinal conveyor and activates the "Sensor" triggering the process (Activate another palette). This process will allow the next product palette to move. The pallet reaches the handling point, where the sensor activates a stop gate preventing the pallet from moving. The "Sensor" also sends an instruction to execute the subroutine (Pick & Place). This process is performed by the IRB 360 robot, which moves the components from the pallet and sends a signal to release the stop gate, which allows the empty pallet to move. After releasing the handling stop, the empty pallet moves towards the next cross conveyor. There it activates the "Sensor", which initiates the execution of the process (Cross conveyor 2). This process is identical in structure to the process cross conveyor 1. After moving through the cross conveyor, the pallet is allowed to move on the original longitudinal conveyor, where with the help of the "Sensor" activating the process (Return to home) the pallet stops at the end stop.

The view of the realized workplace is shown in Fig. 8.

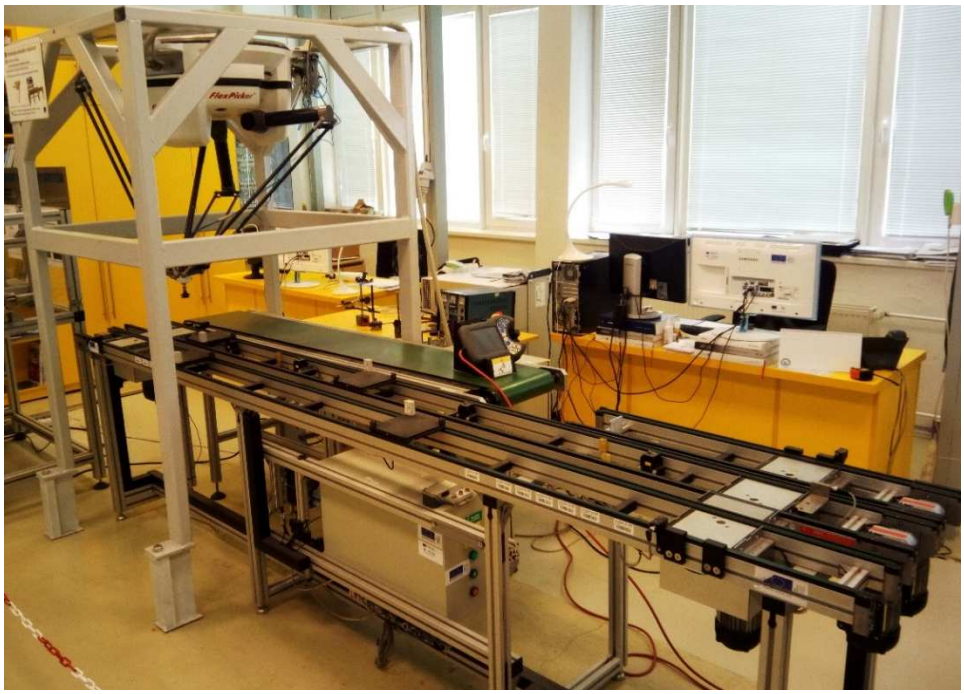


Fig. 8. Realized workplace

In order for the handling process to be performed correctly, it is necessary to ensure proper communication between all peripherals of the workplace. In Fig. 9 shows the interconnection of all control elements and devices involved in the handling process.

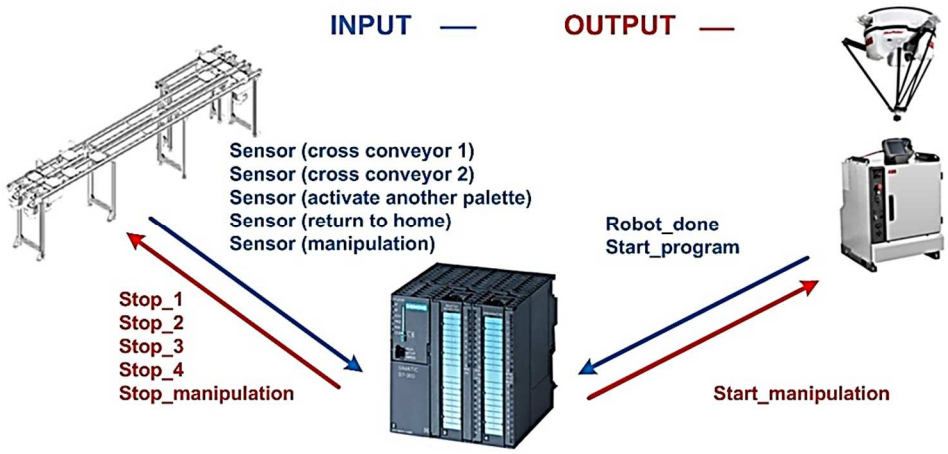


Fig. 9. Inputs and outputs interconnection structure

The inputs are responsible for sending signals from devices located on the conveyor or robot to the PLC. Based on the inputs entered into the PLC, the entire program structure and logic of the entire process is controlled. It is responsible for activating the outputs, which are sent back to the periphery of the conveyor or to the robot [8].

Conclusions. This article shows an example of the handling process with a modular conveyor and the IRB360 Flexpicker robot. The process is relatively simple and allows connection to various other processes or components. The conveyor was equipped and controlled by a Siemens S7 / 300 PLC, which communicated with the IRC5 control system. The IRC5 system, in turn, was responsible for controlling the IRB 360 robot.

The simulation in Robot Studio helped to visualize the whole manipulation process, in which all controlled elements are shown. The software solution of this process also offers flowcharts of individual threads as well as Ladder Logic diagrams controlling of PLCs.

The handling process consisted of 4 pallets with products whose movement was gradually activated to ensure sufficient spacing. These products were moved to a predetermined location using an IRB 360 robot. Subsequently, the pallets returned to their original position. The transfer between the longitudinal conveyors was ensured by transverse conveyors.

For the needs of the handling process, it was necessary to modify the modular conveyor and implement inductive sensors recording moving pallets and stop gates, which allowed to stop the pallet at a predetermined place and release it based on the needs of the handling process.

Acknowledgements. This article was created thanks to the KEGA project support: 010TUKE-4/2020 - Implementation of new knowledge and innovative approaches to the process of teaching robotics in line with Industry 4.

References

1. *Hajduk. M., et al. (2018).* Principles of Formation of Flexible Manufacturing Systems, In: *Technical Gazette*, Vol. 25, No. 3 (2018), s. 649-654, ISSN 1330-365.

2. *Semjon, J., et al. (2018).* Comparison of the delta robot ABB IRB 360 properties after collisions, In: *Communications - Scientific Letters of the University of Zilina*, Vol. 20, No. 1 (2018), s. 42-46. ISSN 1335-4205.

3. Delta Parallel Robot. http://www.parallemic.org/Reviews/Review002.html.

4. ABB IRB 360. https://new.abb.com/products/robotics/en/roboty/irb-360.

5. Bosch Rexroth. TS-1 Transfer System. 2020. https://www.boschrexroth.com/en/xc/products/product-groups/assembly-technology/topics/transfer-systems/transfer-system-ts-1/index.

6. Bosch TS1 Transfer System. version 2018. http://www.boschrexroth.com/various/utilities/mediadirectory/index.jsp?publication=NET&language=en-GB&ccat_id=40460&remindCcat=on.

7. Siemens Simatic S7/300 Manual. 2017. https://cache.industry.siemens.com/dl/files/629/8859629/att_55794/v1/s7300_module_data_manual_en-US_en-US.pdf.

8. *Semjon, J., et al. (2019).* Programovanie priemyselných robotov II, 1. vyd. Košice : Technická univerzita v Košiciach. 2019. 126 s. [CD-ROM]. ISBN 978-80-553-3418-9.

УДК 621.8

Ян Семйон, Мартін Фуфал, Мартін Кочан

ПРОЄКТУВАННЯ ПРОЦЕСУ ОБРОБКИ НА РОБОЧОМ МІСЦІ З РОБОТОМ ABB ТА МОДУЛЬНИМ КОНВЕЄРОМ

Актуальність дослідження. *Наразі використання роботизованих операцій Pick & Place у промисловості набуває дедалі більшого значення завдяки збільшенню продуктивності праці на робочому місці. Впровадження таких робототехнічних робочих місць у харчовій промисловості, де необхідно обробляти велику кількість продуктів, дозволяє підтримувати конкурентоспроможність виробників даної продукції. Можливість проводити демонстрації та тренінги на робочих місцях, які не є безпосередньо частиною виробництва, дозволяє студентам та робітникам випробувати ці процеси без необхідності зупиняти виробництво.*

Постановка проблеми. *Метою є розробка функціонального робочого місця, завданням якого буде реалізація демонстрацій роботи на робототехнічному робочому місці. Спроектоване робоче місце також може використовуватись у навчальному процесі, де студенти матимуть можливість вдосконалити свої знання з програмування завдань Pick & Place з використанням паралельного робота. Одночасно студенти зможуть програмувати логіку руху піддону на модульному конвеєрі та синхронізувати цей рух із рухом робота.*

Аналіз останніх досліджень і публікацій. *Автоматизація чи роботизація неможливі без використання сучасних конвеєрних систем. Тому необхідно постійно намагатися вдосконалювати сучасні системи для підвищення їхньої продуктивності при збереженні необхідної якості. Цього можна досягти не тільки за рахунок оптимізації процесів, але й за допомогою сучасних модульних конвеєрних систем.*

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. *Підвищення компетентності працівників та студентів у програмуванні роботизованих робочих місць покращує їх використання на ринку праці. Цього неможливо досягти лише теоретичною підготовкою, необхідно мати справжні навчальні робочі місця, обладнані відповідною технологією.*

Мета дослідження. *Метою є проектування робототехнічного робочого місця, що забезпечить збільшення потенціалу співробітників чи студентів та дозволить розвинути їхнє творче мислення. Використання запропонованих об'єктів для маніпуляцій має лише демонстраційний характер і передбачає, що здобувачі вищої освіти самостійно під час навчального процесу запропонують власне конструктивне рішення цієї проблеми.*

Виклад основного матеріалу. *Впровадження паралельних роботів у різні операції постійно збільшується. Тому підготовка відповідних робітників для оптимального використання робототехнічних робочих місць дуже важлива, враховуючи перехід на Industry 4.0.*

Висновки відповідно достатті*. Описано модифікацію модульного конвеєра для потреб робототехнічного робочого місця, оснащеного паралельним роботом. Робоче місце оснащене роботом IRB 360/3 - 1130, модульним транспортером Bosch, оснащеним піддонами, і стрічковим транспортером власного виробництва. Паралельний робот оснащений присоскою, що дозволяє переміщувати деталі вагою до 300 г. Запропонований процес обробки передбачає перенесення деталей у формі куба з модульного на стрічковий конвеєр. При проектуванні робочого місця потрібно було замінити пошкоджений блок управління в модульному конвеєрі, оснастити конвеєр системою додаткових датчиків і запрограмувати робоче місце. Запропоноване робоче місце може бути використано у якості демонстраційного робочого місця в університеті, а також для навчання здобувачів вищої освіти програмуванню роботів та модульних конвеєрів.*

Ключові слова: *робот; програмування; конвеєр; піддон.*

Рис.: 9. Табл.: 1. Бібл.: 8.

Jan Semjon – Associate Professor, PhD, Technical University of Kosice, Faculty of Mechanical Engineering, Department of production systems and robotics (Park Komenskeho 8, 04200 Kosice, Slovakia).
E-mail: jan.semjon@tuke.sk
Scopus Author ID: 55571411200

Martin Fufal – Student of engineering studies, Technical University of Kosice, Faculty of Mechanical Engineering, Department of production systems and robotics (Park Komenskeho 8, 04200 Kosice, Slovakia).
E-mail: martin.fufal.student@tuke.sk

Martin Kocan – Student of PhD studies, Technical University of Kosice, Faculty of Mechanical Engineering, Department of production systems and robotics (Park Komenskeho 8, 04200 Kosice, Slovakia).
E-mail: martin.kocan.student@tuke.sk

Semjon, J., Fufal, M., Kocan, M. (2020). Design of the handling process at the workplace with ABB robot and modular conveyor. *Technical sciences and technologies*, *3*(21), pp. 112-119.

UDC 681.5:004.942
DOI: 10.25140/2411-5363-2020-3(21)-120-128

Darina Hroncová

COMPUTER SIMULATION AND ANALYTICAL SOLUTION OF FOUR BAR MECHANISM

Urgency of the research. *The use of computers in technical practice leads to the extension of the possibility of solving mathematical models. This makes it possible to gradually automate complex calculations of equations of mathematical models. It is necessary to input the relevant inputs of the mathematical model, to build a simulation computer model and to monitor and evaluate the output results using a computer's output device.*

Target setting. *The possibilities of modeling a four-bar linkage mechanism by classical analytical methods and methods using computer modeling are presented in this paper. The problem is to describe the creation of a computer model and to show the mathematical model and its solution in the classical ways.*

Actual scientific researches and issues analysis. *The inspiration for the creation of the article was the study of the mechanisms in the work [1-3] and the study of other resources available in library and journal materials, as well as prepared study materials for students of Technical university Kosice.*

Uninvestigated parts of general matters defining. *The question of building a real mechanism model. The possibilities to building a real model, based on the result of simulation.*

The research objective. *The aim of this paper is to develop a functional model of the mechanism in ADAMS/View and Matlab and its complete kinematic analysis.*

The statement of basic materials.

The task was to create a computer model in MSC Adams and Matlab and to perform a four-bar linkage mechanism kinematic analysis. At the same time the classical procedure of analytical methods of kinematic analysis was described. Kinematic characteristics of driven members and their selected points were determined. The movement of the parts of the mechanism in its significant points was analyzed. The results of the solution were shown in both programs in graphical form. Kinematic analysis was performed by both vector and graphical methods. Finally, the results with a graphical representation of parameters such as angular displacement, angular velocity and angular acceleration of mechanism members are presented in this work. The results of these solutions are created in the form of graphs.

To ensure that the results do not differ from the model real, a good computer model gradually was created by its verification and modification, which is one of the advantages of MSC Adams.

The practical applicability of the mathematical model was limited by the existence of an analytical solution.

Conclusions. *The development of computer technology has expanded the limit of solvability of mathematical models and made it possible to gradually automate the calculation of equations of mathematical models. In a computer model the automated calculation can be treated as a real object sample. In various variations of calculation, we can monitor and measure the behavior of an object under different conditions, under the influence of different inputs. Graphical and vector methods were used for classical analytical methods. MSC Adams and Matlab were used for the automated calculations.*

Keywords: *kinematics, mechanical system, four bar linkage mechanism, computer simulation.*
Fig.: 13. References: 18.

Introduction. When solving the movements of machine parts, machines and equipment it is necessary to create a kinematic model first. The kinematic solution of the mechanisms is to detect individual driven members or some points of these members depending on the known or prescribed movement of the drive members. This involves determining the dependence of position, velocity and acceleration, rotation of angles, angular velocity, and angular acceleration of the investigated members and points depending on the movement of the drive member. The graphical and vector method also play an important role in the analytical solution of mechanisms. The kinematic model of the mechanism schematically captures all its properties, which are necessary in kinematic analysis, individual members with dimensions, kinematic pairs. The classical numerical solution of kinematics is often time consuming and difficult especially for complex kinematic models with different movements. Today, we can use a graphical solution to simplify and speed up the analysis. This is currently being replaced by a computer-based solution using a variety of software products. These software products facilitate the efforts of the solver. The solver enters the model configuration and input data, and the program then calculates the required outputs. These data can be presented in form of graphic results [1-4].

Description of the mechanical system. The presented paper shows the solution of kinematic analysis of mechanisms by classical methods of analytical mechanics and computer programs available today. Graphical method and vector method from analytical methods of solving

© Гронцова Д., 2020

mechanisms and computer programs Matlab and MSC Adams are used. In the kinematic analysis of the model of four-bar mechanism, the following parts of the paper show the solution by the graphical method, then the model is created in the MSC Adams program and the vector method is shown and its solution is performed using Matlab.

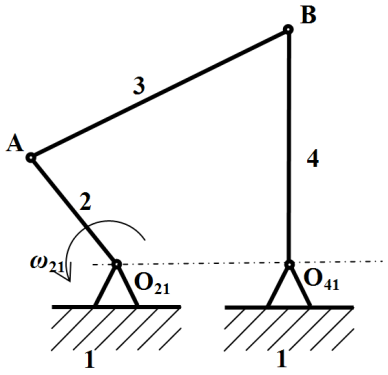
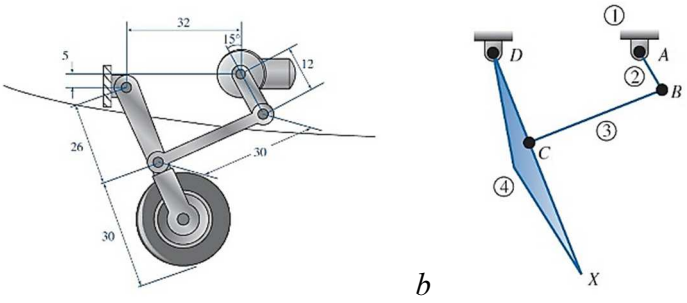


Fig. 1. Mechanical system of the four-bar mechanism

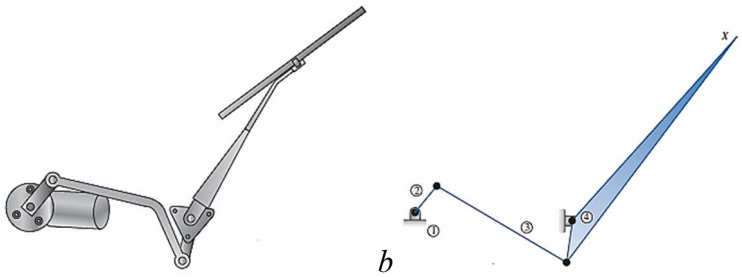
A four-bar mechanism shown in Fig.1 consists of four members, called bars or links. They are connected in a loop by four joints. A link connected to ground by a joint is called a crank. Driving link $O_{21}A$ has a counter clockwise angular velocity $\omega_{21}=1$ (rad/s). Our task is to determine angular displacement φ_{41}, angular velocity ω_{41} and angular acceleration α_{41} of the link $O_{41}B$ graphically for the crank position indicated and then to create a model of a mechanism in MSC Adams/View and next in MATLAB environment. The crank $O_{21}A$ rotates around point O_{21}, motion of the connecting member AB is a general plane motion and member $O_{41}B$ rotates around point O_{41}. We indicate velocities of the points A and B [1-5].

Examples of mechanical systems. In engineering practice we can meet the following forms of the four-bar mechanism of mechanical systems. Examples of mechanisms are shown in Fig. 2 and Fig. 3 [1].



a *b*

Fig. 2. Mechanical system: a – nose wheel assembly; b – kinematic scheme [1]



a *b*

Fig. 3. Mechanical system: a – rear-window wiper mechanism; b –kinematic scheme [1]

Kinematics analysis of the model. The velocity of points A and B can be obtained by using the rule of the viewing angles [4]. Tangent of the angle β_{v21} under which we see the endpoints

of velocity from the permanent center of rotation is proportional to the angular velocity of the rotating member (Fig. 4).

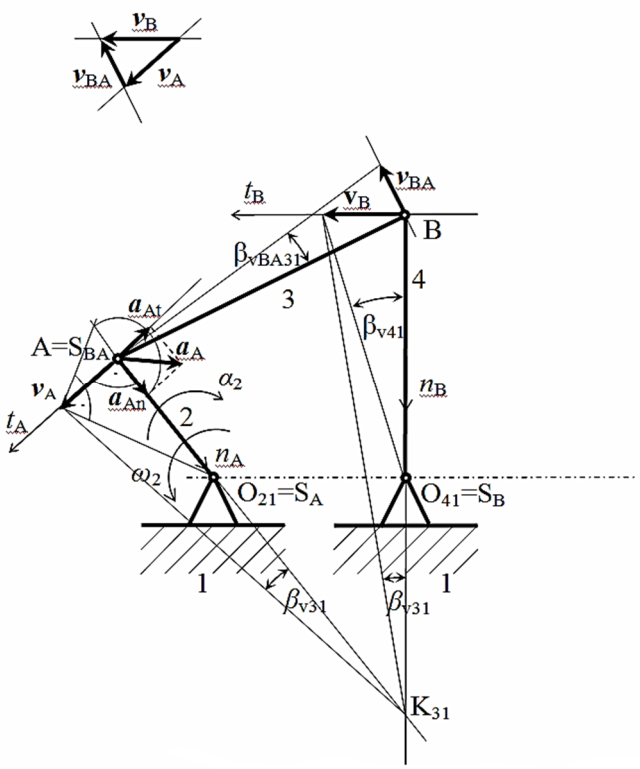


Fig. 4. The four-bar mechanism with velocity in point A and velocity in point B

If we denote the angular velocity ω_{21} of the member 2 with respect to 1, then for the velocity v_A and acceleration a_{An} at point A shall apply [5-8]:

$$v_A = \overline{O_{21}A} \cdot \omega_{21} \tag{1}$$

Normal component of the acceleration in point A:

$$a_{An} = \frac{v_A^2}{\overline{O_{21}A}} \tag{2}$$

Angular velocity ω_{21}:

$$tg\beta_{v21} = \frac{v_A}{\overline{O_{21}A}} = \dot{\varphi}_{21} = \omega_{21} \tag{3}$$

Angular velocity ω_{31}:

$$tg\beta_{v31} = \frac{v_A}{\overline{K_{31}A}} = \frac{v_B}{\overline{K_{31}B}} = \omega_{31} \tag{4}$$

Velocity of point B:

$$v_B = \overline{K_{31}B} \cdot \frac{v_A}{\overline{K_{31}A}} \tag{5}$$

Angular velocity ω_{41} of the member 4 we determine:

$$\omega_{41} = \frac{v_B}{\overline{O_{41}B}} \tag{6}$$

The member 3 is moving in the plane in form 3:1=3:2+2:1 and also 3:1=3:4+4:1. For the velocity of the point A:

$$v_{A31} = v_{A32} + v_{A21} \tag{7}$$

For the velocity of the point B:

$$v_{B31} = v_{B34} + v_{B41} \tag{8}$$

$$v_{B31} = v_{A31} + v_{BA31} \tag{9}$$

Acceleration a_B of the point B [6-7]:

$$a_B = a_A + a_{BA} \tag{10}$$

Where a_{Bt} – known direction,

a_{Bn} – can be obtained by Euclidean construction,

a_{At} – is zero because

$$\omega_{21} = konst \Rightarrow \alpha_{21} = 0, a_{At} = \alpha_{21} \cdot \overline{O_{21}A} = 0 \tag{11}$$

a_{An} – is normal component of the acceleration of the point A:

$$a_{An} = \frac{v_A^2}{\overline{O_{21}A}} \tag{12}$$

Graphical solution of the above vector equation is in the Fig. 4. Angular velocity ω_{41} and angular acceleration α_{41} is then calculated according to:

$$\omega_{41} = \frac{v_B}{\overline{O_{41}B}} \tag{13}$$

$$\alpha_{41} = \frac{a_{Bt}}{\overline{O_{41}B}} \tag{14}$$

In Fig. 4 there is the model in graphic form with velocities of points A and B.

Normal component of the acceleration in point A and B is shown in Fig. 5.

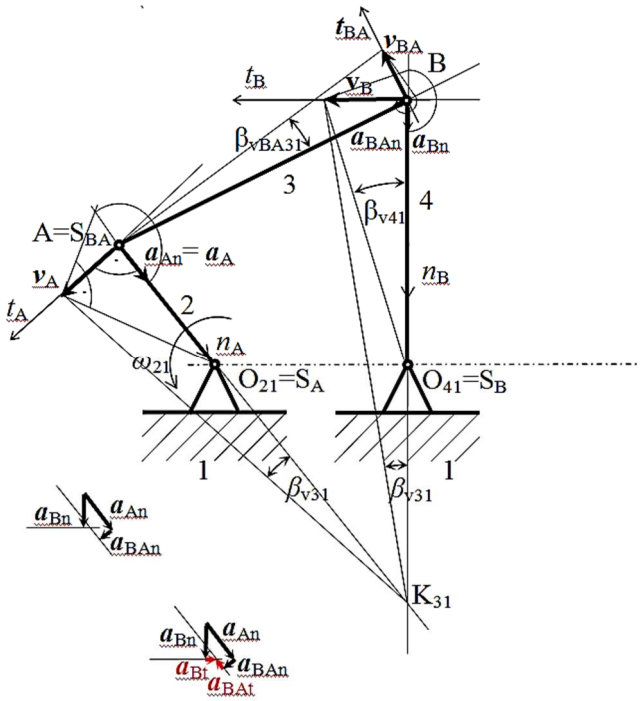


Fig. 5. The four-bar mechanism with acceleration in point A and velocity in point B

Model of the four-bar mechanism using MSC Adams/View. The given four-bar mechanism was modeled in MSC ADAMS/View and the initial parameters were provided [1-5]. In the initial window of the program MSC Adams we set data folder, name of the project, units and the working grid. We created the individual bodies of the mechanism. We selected the rigid body link from the Toolbox.

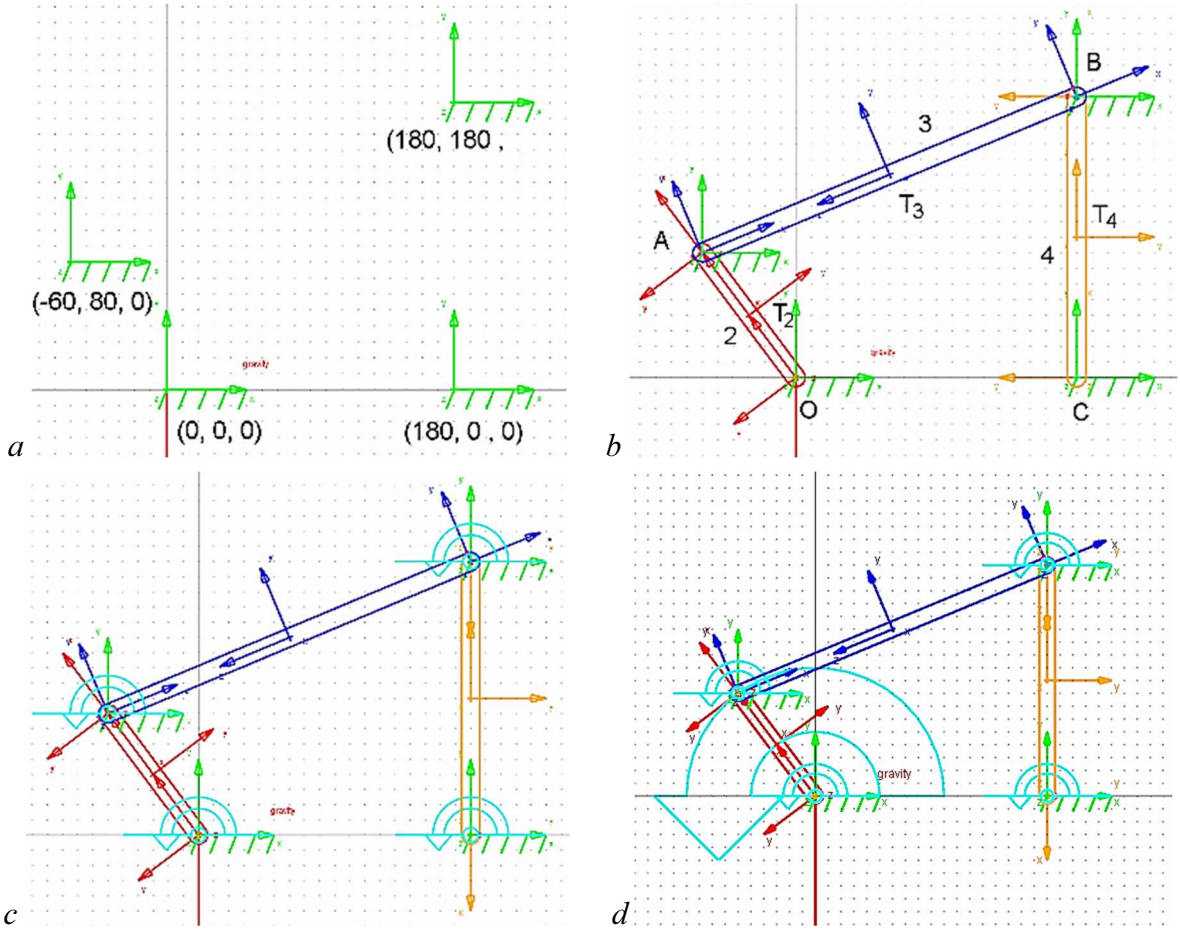


Fig. 6. The four-bar mechanism and creation:
a – points; b – members; c – joints; d – motion

We defined the geometry, length, width and depth. Driving link $O_{21}A$ (Fig. 1) has a counterclockwise angular velocity ω_{21}=1 rad/s, [8-12]. We select point tool in Main Toolbox. Move the cursor to (0, 0, 0) position and points 1, 2, 3 and 4 are created a named automatically (Fig.6, a). Then move the cursor to (180, 0, 0) position and created the member 4 (Fig.6, b). The member 2 should be rotated about point from horizontal position to counter clockwise rotate. Then connected the members 3 with member 2 and 4 (Fig. 6, b). Next we created joints between the members and ground (Fig. 6, c). Select the rotational joint motion tool with speed 1 rad/s [6-7] (Fig. 6, d).

The final model of the mechanism is shown in Fig. 7. We create the measure windows for angle φ_{41}, angular velocity ω_{41} and angular acceleration α_{41} of the member 4. Then we start simulation and we determine angle displacement φ_{41}, angular velocity ω_{41} and angular acceleration α_{41} of the member 4 (Fig. 8-11). The graph in Fig. 8a-b) describes the motion of the member AB.

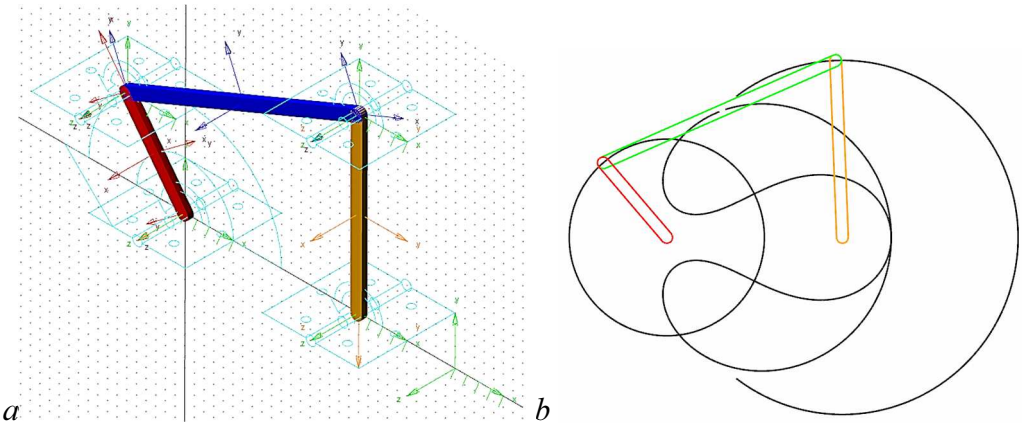


Fig. 7. Model of a four-bar mechanism in MSC Adams View (a), trajectory of the points A, B and x_{T3} of the members of mechanism (b)

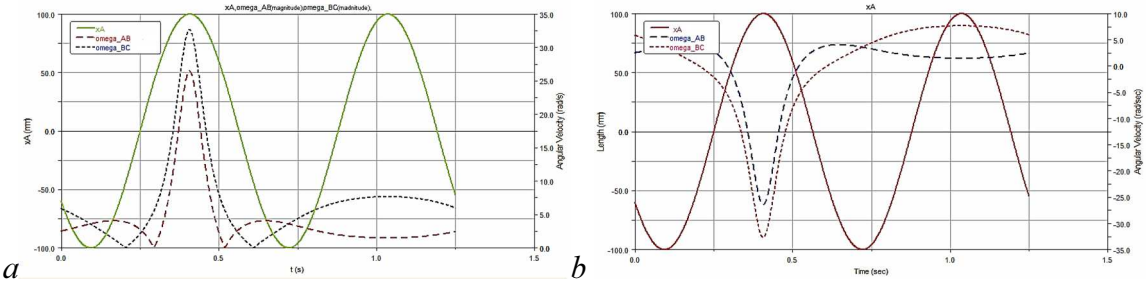


Fig. 8. Displacement $x_A = f(t)$,magnitute of angular velocity $\omega_{AB} = f(t)$and $\omega_{BC} = f(t)$ (a); displacement $x_A = f(t)$, angular velocity $\omega_{AB} = f(t)$and $\omega_{BC} = f(t)$ (b)

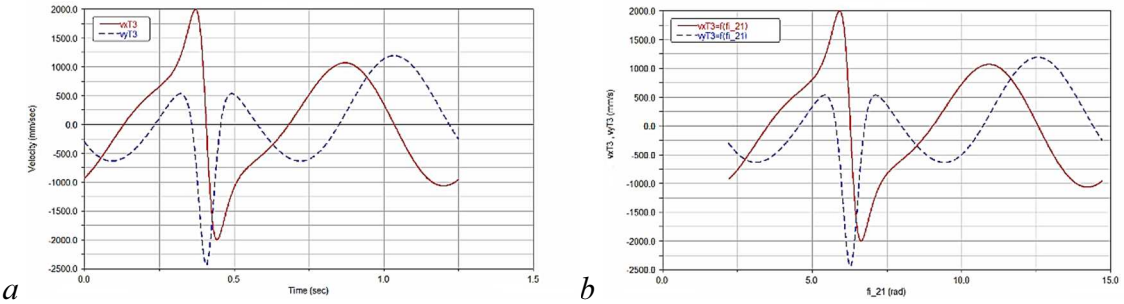


Fig. 9. Velocity $v_{xT3} = f(t)$ and $v_{yT3} = f(t)$, b) velocity $v_{xT3} = f(\varphi_{21})$ and $v_{yT3} = f(\varphi_{21})$

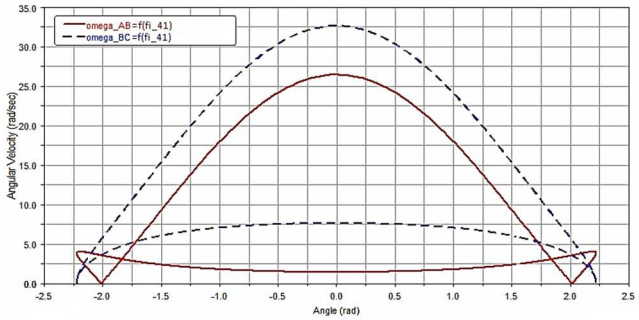


Fig. 10. The angular velocity $\omega_{AB}=f(\varphi_{41})$and $\omega_{BC}=f(\varphi_{41})$

In the window of the Postprocessor we selected window with animation of the mechanism and windows with results data in graphics form for angle φ_{41}, angular velocity ω_{41} and angular acceleration α_{41} of the member 4 (Fig. 11).

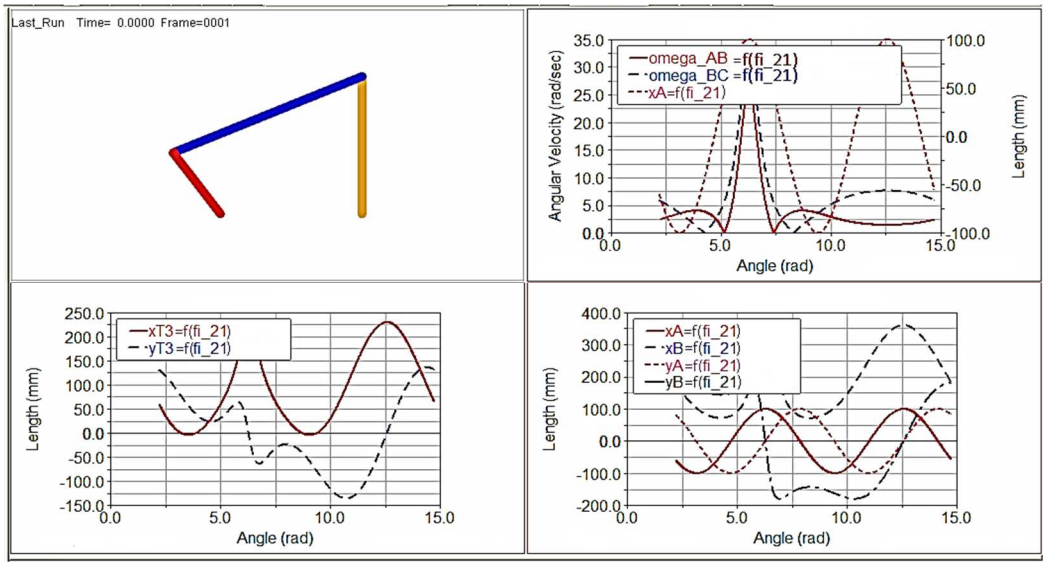


Fig. 11. Illustration of the Postprocessor windows with model of mechanism, angular velocity ω_{AB}, angular velocity ω_{BC}, displacement of x_A, x_B, y_A, y_B, x_{T3}, y_{T3} versus angle φ_{21}

Simulation of four-bar mechanism in Matlab. When applying the vector method, we replace the mechanism with vectors that connect individual kinematic pairs. The result is a closed polygon in Fig.12.

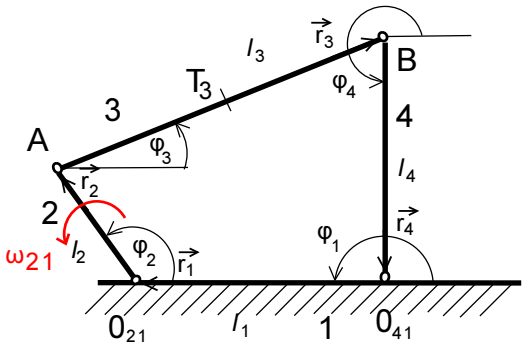


Fig. 12. Indication of vectors in vector method

We write a vector equation (15) for this polygon (Fig.12) and two scalar equations (16) and (17) for its components. The matrix equation of the polygon [8-13]:

$$\mathbf{r}_1 + \mathbf{r}_2 + \mathbf{r}_3 + \mathbf{r}_4 = \mathbf{0}. \tag{15}$$

Scalar equations in form:

$$l_1\cos\varphi_1 + l_2\cos\varphi_2 + l_3\cos\varphi_3 + l_4\cos\varphi_4 = 0 \tag{16}$$

$$l_1\sin\varphi_1 + l_2\sin\varphi_2 + l_3\sin\varphi_3 + l_4\sin\varphi_4 = 0 \tag{17}$$

After the differentiation of the equations (16) and (17) over time, we obtain the equations for determining angular velocities shown in matrix form:

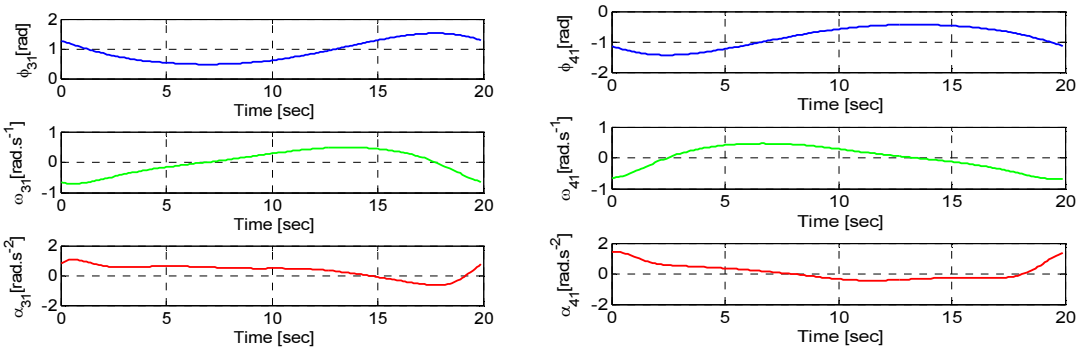
$$\begin{bmatrix} l_3\sin(\varphi_3) & l_4\sin(\varphi_4) \\ l_3\cos(\varphi_3) & l_4\cos(\varphi_4) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{\varphi}_3 \\ \dot{\varphi}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l_2\dot{\varphi}_2\sin(\varphi_2) \\ -l_2\dot{\varphi}_2\cos(\varphi_2) \end{bmatrix} \tag{18}$$

After the differentiation of the equations (18) over time, we obtain the equations for determining angular acceleration in matrix form:

$$\begin{bmatrix} l_3\sin(\varphi_3) & l_4\sin(\varphi_4) \\ l_3\cos(\varphi_3) & l_4\cos(\varphi_4) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \ddot{\varphi}_3 \\ \ddot{\varphi}_4 \end{bmatrix} == \begin{bmatrix} -l_2\ddot{\varphi}_2\sin(\varphi_2) - l_2\dot{\varphi}_2^2\cos(\varphi_2) - l_3\dot{\varphi}_3^2\cos(\varphi_3) - l_4\dot{\varphi}_4^2\cos(\varphi_4) \\ -l_2\ddot{\varphi}_2\cos(\varphi_2) + l_2\dot{\varphi}_2^2\sin(\varphi_2) + l_3\dot{\varphi}_3^2\sin(\varphi_3) + l_4\dot{\varphi}_4^2\sin(\varphi_4) \end{bmatrix} \tag{19}$$

These problems can also be solved for example, using the Matlab [13-18]. The results of the simulation are in (Fig. 13a-b), where:

$\dot{\varphi}_{31} = \omega_{31}$, $\dot{\varphi}_{41} = \omega_{41}$, $\ddot{\varphi}_{31} = \alpha_{31}$, $\ddot{\varphi}_{41} = \alpha_{41}$.



a *b*

Fig. 13. The angle-time, angular velocity-time and angular acceleration-time graph of the member 3 (a), of the member 4 (b)

Conclusions. The paper presents the possibilities of modeling a four-bar linkage mechanism by classical analytical methods and computer methods using computer modeling. The aim of this paper is to develop a functional model of the mechanism in ADAMS/View and its complete kinematic analysis. Furthermore a solution is also realized in the Matlab software. We analyze the movement of the members of the mechanism of its significant points. Kinematic analysis was performed with vector and graphical methods. Finally, the work presents results with a graphical representation of parameters such as angular displacement, angular velocity and angular acceleration of mechanism members. The results of these solutions are created in the form of graphs.

Acknowledgement. This work was supported in part by the Ministry of Education of the Slovakia Foundation under grant projects VEGA No. 1/0389/18, grant projects KEGA No. 018TUKE-4/2018 and grant projects KEGA No. 030TUKE-4/2020.

References

1. Myszka, D. H.: Machines and Mechanisms. Prentice Hall, New Yersey, 2012.
2. Rákay, R.: Kinematická analýza štvorčlenného mechanizmu využitím MSC ADAMS/View. Bachelor Thesis, TU Košice, Košice, 2012.
3. Bartko, R., Miller, M.: MATLAB I - algoritmizácia a riešenie úloh. Bratislava, 2004.
4. Karban, P.: Výpočty a simulace v programech Matlab a Simulink, Computer Press, Brno, 2006.
5. Kelemen, M., Miková, Ľ., Virgala, I.: Informatika. Edícia študijnej literatúry TU Košice, Košice, 2014.
6. Gmiterko, A.: Mechatronics. Emilenia, Košice, Slovakia, 2004.
7. Gmiterko, A., Šarga, P., Hroncová, D.: Mechatronika I. Technická univerzita Košice, Košice, Slovakia, 2012.
8. Gmiterko, A., Šarga, P., Hroncová, D.: Teória dynamických systémov. Edícia študijnej literatúry TU Košice, Košice, 2010.
9. Hroncová, D., Huňady, R., Miková, Ľ., Sivák, P.: Simulácia v programme Matlab/Simulink. Technická univerzita Košice, Košice, Slovakia, 2019.
10. Huňady, R., Hroncová, D., Lengvarský, P., Miková, Ľ.: Modelovanie mechanických sústav v programme MSC Adams. Technická univerzita Košice, Košice, Slovakia, 2019.
11. Delyová, I., Frankovský, P., Hroncová, D., 2011. Kinematics analysis of movement of a point of a simple mechanism, In: Modelling of mechanical and mechatronic systems 2011, *The 4th International conference*, TU Košice, Herľany, Slovakia.
12. Vavro, J., Jr., Vavro, J., Kováčiková, P., Bezdedová, R., Híreš, J. (2017). Kinematic and dynamic analysis and distribution of stress in items of planar mechanisms by means of the MSC ADAMS software, Manufacturing Technology, Volume 17, Issue 2, Pages 267-270.

13. Segľa, Š., Segľa, J., 2011. Modelling and Optimization of Vehicle suspension with Magnetorheological Dampers, *7th International Conference Dynamics of Rigid and Deformable Bodies 2008*, FVTM UJEP Ústí nad Labem , Česko.

14. Skočilas, J., Skočilasová, B., Soukup, J., 2011. Investigation and vibration of vehicle mechanical model. In: *Dynamika tuhých a deformovatelných těles 2011 - Sborník přednášek z 9. mezinárodní konference v Ústí nad Labem*, FVTM UJEP, Ústí nad Labem, Česko.

15. Miková, Ľ.: Didactic model of lift, Technical sciences and technologies, 3 (13), Chernihiv, 2018.

16. Semjon J., Kostka J., Mako P.: Using the simulation program for the design and optimization of the production line. Technical sciences and technologies, 3 (13), Chernihiv, 2018.

17. Gmiterko A., Miková Ľ., Prada E. Analysis of air-spring for a link of hyper-redundant manipulator. Technical sciences and technologies, 3 (13), Chernihiv, 2018.

18. Božek, P., Turygin, Y.: Measurement of the operating parameters and numerical analysis of the mechanical subsystem, Measurement Science Review, Vol. 14, No. 4, pages 198-203, 2014.

УДК 681.5:004.942

Дарина Гронцова

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІТИЧНЕ РІШЕННЯ ЧОТИРИЛАНКОВОГО МЕХАНІЗМУ

Актуальність теми дослідження. *Використання комп'ютерів в технічній практиці призводить до розширення можливостей створення математичних моделей. Це дає можливість поступово автоматизувати складні обчислення рівнянь математичних моделей. Необхідно ввести відповідні вхідні дані математичної моделі, побудувати імітаційну комп'ютерну модель, а також контролювати і оцінювати вихідні результати за допомогою пристрою комп'ютерної периферії.*

Постановка проблеми. *У статті представлені можливості моделювання чотириланкового важільного механізму класичними аналітичними методами і методами комп'ютерного моделювання. Завдання полягає в тому, щоб описати створення комп'ютерної моделі і показати математичну модель та її розв'язання класичними способами.*

Аналіз останніх досліджень і публікацій. *Натхненням для створення статті послужило вивчення механізмів в роботах [1-3] і вивчення інших ресурсів, доступних в бібліотечних та журнальних матеріалах, а також підготовлені навчальні матеріали для студентів Технічного університету Кошице.*

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. *Питання побудови реальної моделі механізму. Можливості побудови реальної моделі на основі результату моделювання.*

Мета статті. *Метою даної роботи є розробка функціональної моделі механізму в ADAMS / View і Matlab та його повний кінематичний аналіз.*

Виклад основного матеріалу. *Завданням було створити комп'ютерну модель в MSC Adams і Matlab та виконати кінематичний аналіз чотириланкового важільного механізму. Одночасно була описана класична процедура аналітичних методів кінематичного аналізу. Були визначені кінематичні характеристики керованих членів та вибрані ними точки. Проаналізовано рух частин механізму у його значущих точках. Результати рішення були показані в обох програмах у графічному вигляді. Кінематичний аналіз проводили як векторними, так і графічними методами. Нарешті, в цій роботі представлені результати з графічним зображенням таких параметрів, як кутове переміщення, кутова швидкість та кутове прискорення елементів механізму. Результати цих рішень представлені у вигляді графіків. Щоб результати не відрізнялися від реальних моделей, поступово була створена хороша комп'ютерна модель шляхом її перевірки та модифікації, що є однією з переваг MSC Adams. Практична придатність математичної моделі була обмежена існуванням аналітичного рішення.*

Висновки відповідно до статті. *Розвиток обчислювальної техніки розширив межу розв'язності математичних моделей і дозволив поступово автоматизувати обчислення рівнянь математичних моделей. У комп'ютерній моделі автоматизований розрахунок можна розглядати як реальний зразок об'єкта. У різних варіантах розрахунків ми можемо контролювати та вимірювати поведінку об'єкта за різних умов, під впливом різних вхідних даних. Для класичних аналітичних методів використовувались графічний та векторний методи. Для автоматизованих розрахунків використовували MSC Adams і Matlab.*

Ключові слова: *кінематика; механічна система; чотириланковий механізм зчеплення; комп'ютерне моделювання.*

Hroncová Darina – Ing., PhD, Faculty of Mechanical Engineering, Technical University of Kosice (Letna 9, 04200 Kosice, Slovakia).
E-mail: darina.hroncova@tuke.sk
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5988-8353
SCOPUS Author ID: 55988359500

Hroncová, D. (2020). Computer simulation and analytical solution of four bar mechanism. *Technical sciences and technologies*, *3*(21), pp. 120-128.

UDC (07)621.7,621.8
DOI: 10.25140/2411-5363-2020-3(21)-129-134

Peter Tuleja

ANALYSIS OF EXISTING DRIVE UNIT SOLUTIONS FOR THE PNEUMOBILE PROJECT

Urgency of the research. *Today, there is a need to provide alternative propulsion methods in the automotive industry. Compressed air is one of the alternatives to fossil fuels.*

Target setting. *To test the possibilities of using compressed air as energy for vehicle propulsion, a competition is organized, where teams from European universities are presented under the auspices of a company producing pneumatic components. We from the Institute of Automation, Mechatronics, Manufacturing Technology and Robotics also took part in this competition twice. The results of the competition, supplemented by the presentation of a vehicle not yet implemented, are the subject of this article.*

Actual scientific researches and issues analysis. *As this is an analysis of the results achieved, the article deals with the ways in which they were achieved rather than with methods of a scientific nature.*

Uninvestigated parts of general matters defining. *As this is an evaluation of the achieved results, the article does not address specific problems in the theoretical area. The results are presented for review by the reader and give room for his own assessment.*

The research objective. *The aim of the article is to acquaint the public with the results and the ways in which they were achieved. It is also a kind of invitation for potential people interested in this issue.*

The statement of basic materials. *The basis for the creation of the article was information from student works, the result of which were described vehicles.*

Conclusions. The conclusions in the article show the problems that need to be solved for the further continuation of the project, if possible with other "enthusiasts" in the field using compressed air for non-traditional purposes.

Keywords: *Pneumobile Project; analysis; parameters of pneumatic engine; pneumatic components.*

Fig.: 8. Table: 4. References: 11.

Introduction. The previous issues of the magazine already mentioned the activities that were undertaken by our institute in the previous years of the Aventics/Emerson PNEUMOBILE Competition race. The competition since 2007 is traditionally organized in the Hungarian city of Eger. It takes place as a 3-day meeting of enthusiasts, at which individual teams from different European countries present their results in the construction of a vehicle whose propulsion is based on compressed air.

Variants of drive units. There are a relatively large number of variants of the vehicle drive unit construction [2]. In our performance so far in the competition, we have built 3 drive unit concepts. Two of them were confronted directly in the competition, the construction of the third was stopped by the situation around the coronavirus pandemic.

Since the competition regulations allow to build a drive unit exclusively with max. four linear single - piston pneumatic actuators (exclusively from AVENTICS, now part of EMERSON) PRA series [6], the solvers must look for a suitable mechanical variant of the transformation of a linear actuator into a rotary one.

The competition is divided into three separate races [1], the results of which are limited by certain conditions of the pneumatic and mechanical elements used. It is therefore necessary to determine their optimal arrangement so that the vehicle can drive as fast as possible and have sufficient acceleration with minimal air consumption.

Obstacles in this effort are the limited amount of compressed air, its compressibility, the rate of air consumption of individual components and their force effects. All in interaction, Fig. 1.

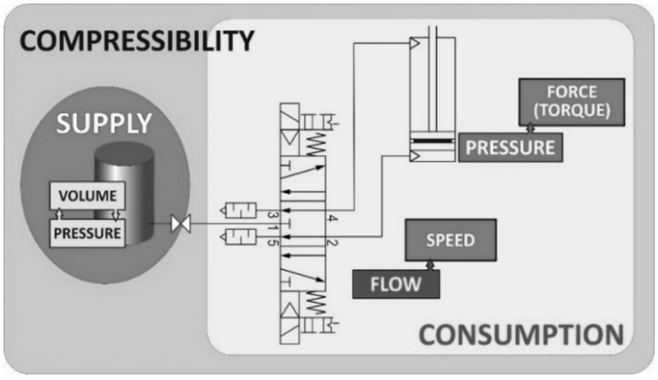


Fig. 1. Parameters influencing the construction of the drive unit

© Петер Тулея, 2020

If we start from a precisely defined and non-renewable supply of compressed air (10 dm^3 of medium, in recent years N_2 compressed to a pressure of 20 MPa) the course of loss of medium is obvious and at the end of pumping the supply also a gradual decrease of usable pressure.

The recalculated volume of air to a pressure value of 1 MPa (the value of the max. pressure with which the vehicle drive can operate) is from Boyle's law (Boyle-Mariott's law):

$p_1.V_1 = p_2.V_2 = konst$, teda $20\,MPa.10\,dm^3 = 1\,MPa.V_2 \rightarrow V_2 = 20.10\,dm^3 = 200\,dm^3$.

Drive unit concepts. So far, three types of power units have been built. The first, Fig. 2, used a trio of pneumatic cylinders with a diameter of 100 mm and a stroke of 80 mm, their arrangement being a star with an angular displacement of the cylinders of 120 °. The torque was transmitted to the rear axle formed by one wheel.

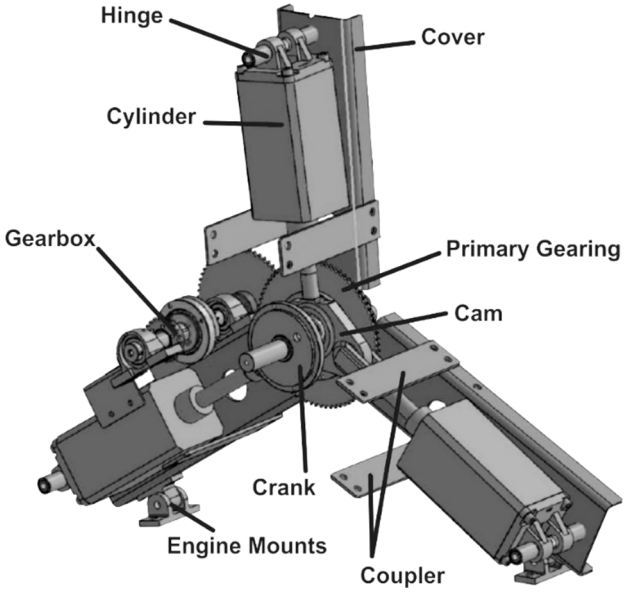


Fig. 2. Engine of the first vehicle [4] - modified by the author

The second version, Fig. 3, used two cylinders with a diameter of 100 mm, but the stroke was 320 mm, with both cylinders engaging independently of the rear driven axle via the rack and pinion mechanism and the interaction of the ratchet mechanism (only half of the drive unit is shown in Fig. 3).

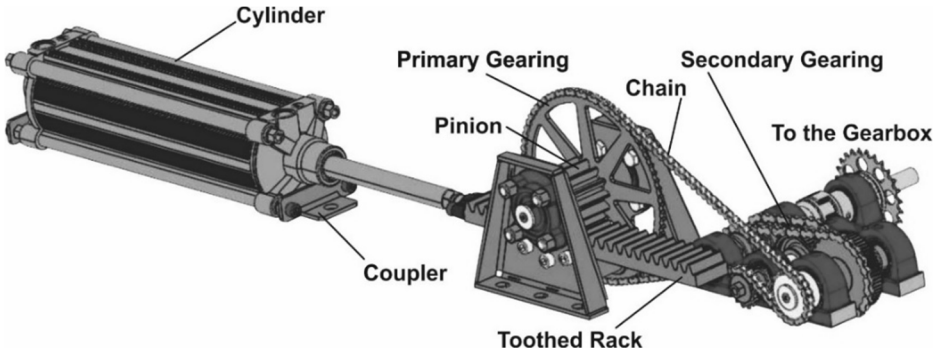


Fig. 3. Engine principle of the second vehicle [9] - modified by the author

The third version due to the COVID 19 pandemic has not yet been completed (work in progress approx. 65%), Fig. 4. It uses a pair of cylinders with a diameter of 63 mm and a stroke of 320 mm. The cylinders are coupled together at the end of their piston rods and fixed to a toothed belt. It engages in pulleys equipped with ratchet mechanisms, which ensures torque when moving in both directions.

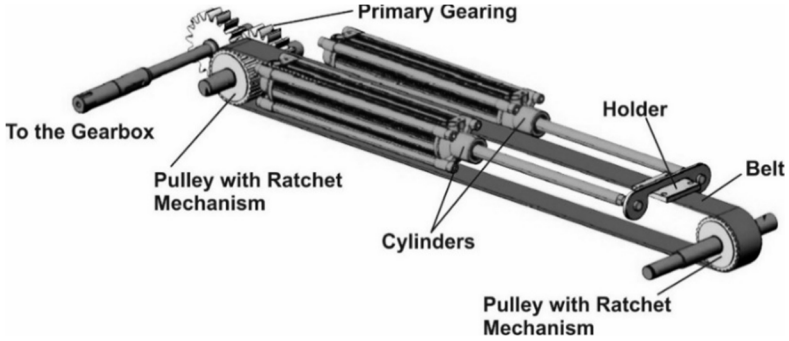


Fig. 4. Third vehicle engine principle (in preparation) [8] - modified by the author

From the point of view of vehicle characteristics, it is possible to evaluate individual versions as follows:

Force characteristics

Theoretical force of used actuators at different pressures:

Table 1

Theoretical forces of used pneumatic cylinders [N]

Piston Diameter [mm]	**Pressure** [MPa]									
	0,1	**0,2**	**0,3**	**0,4**	**0,5**	**0,6**	**0,7**	**0,8**	**0,9**	**1,0**
63	312	623	935	1247	1559	1870	2182	2494	2806	3117
100	785	1571	2356	3142	3927	4712	5498	6283	7069	7854

The efficiency of the drives is usually around 85-90%. We present the theoretical strength and efficiency of the used cylinders only for information, because they do not give a picture of their use for the required torque. It strongly depends on the engine concept itself.

Torque characteristics

The torque on the output shaft of the drive unit is approximately 487 Nm in the case of the 1st vehicle, 122 Nm in the case of the 2nd vehicle and 253 Nm (theoretically) in the case of the 3rd vehicle.

Achieved (expected) speeds

The vehicle must reach a speed of at least 15 km/h, as this is a condition of the Long Distance competition. However, as the Acceleration Race is also run, it is usually higher. The results of vehicles in previous years are shown in tab. 2. For the third vehicle that is being built with a view to placing in the Long Distance competition, the estimated speed is up to 20 km/h.

Table 2

Results of the Acceleration Race competition in the previous two years [10; 11]

Year	***Place***	***Race No.***	***Team Name***	***Time***	***Speed***
2019	16	16	Air Force TUKE	27.270	38.29
2018	21	22	TUKE SjF	34.965	30.60

Air consumption

As the supply of media is limited, this is one of the decisive criteria. The air consumption of a pneumatic drive is calculated from one double stroke of the drive, the total theoretical consumption of individual drive units is given in tab. 3.

Table 3

Air consumption per double stroke of cylinder

***C*ar**	***D*iameter of cylinder *[mm]***	***C*ylinder stroke *[mm]***	***N*umber of cylinders**	***C*onsumption**	
				of one cylinder [dm^3]	***T*otal *[dm^3]***
1	100	80	3	1.256638	5.654868
2	100	320	2	5.026548	10.053096
3	63	320	2	3.989698	7.979396

However, these are only theoretical values. In order to determine the overall effect of propulsion in conjunction with other vehicle equipment, it is necessary to determine the movement characteristics of the vehicle by measurement (testing). The calculations involve determining gear ratios that determine the amount of travel traveled per stroke of the drive. While in the case of the engine of the first vehicle it is a gradual stroke of each of the engine cylinders to perform one revolution of the engine output shaft, for the other two drives this conversion is not applicable.

We therefore present the results documented in the competition, Tab. 4.

For the third vehicle in question, the estimated distance per bottle at an average speed of 15 km/h is approximately 6 km.

Table 4

Results of the Long Distance competition in previous years [10,11]

Year	*Place*	*Race No.*	*Team Name*	*Average Speed*	*Distance*
2019	17	16	Air Force TUKE	16.690 km/h	3208 m
2018	15	22	TUKE SjF	14.509 km/h	3075 m

Gearboxes

Due to the performance characteristics of any air-powered mechanism, a suitable gearbox is also an important piece of equipment.

In the first vehicle, a simple 2° gearbox controlled by a pair of pneumatic cylinders was used, Fig. 5.

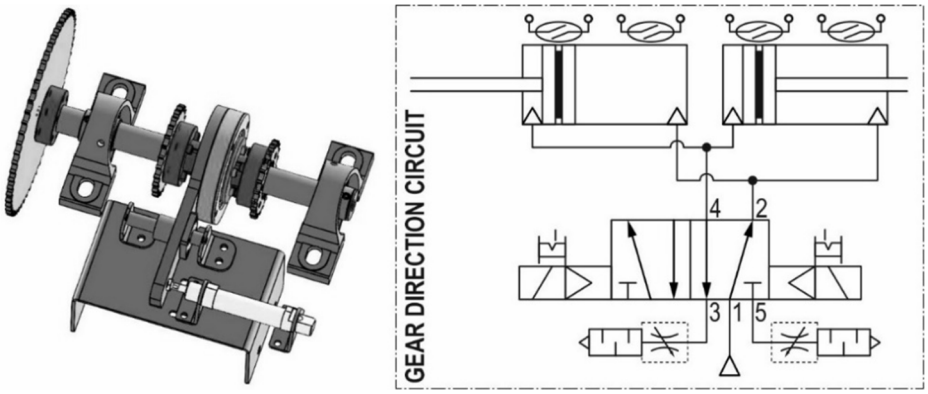


Fig. 5. Simple two-speed gearbox [4]

For the second vehicle, a commercial variator called NuVinci was used [7], Fig. 6.

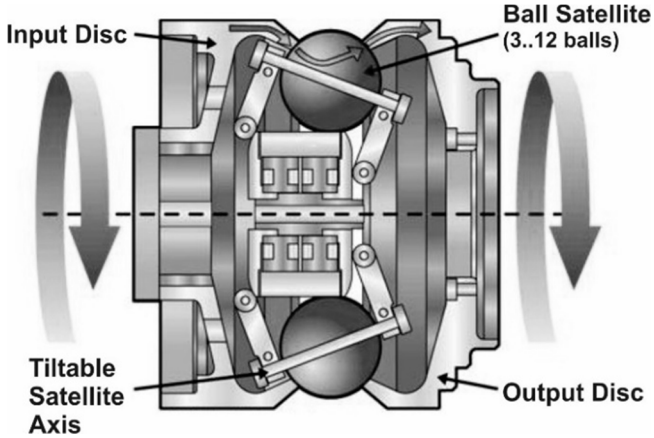


Fig. 6. NuVinci variator principle [7], modified by the author

However, its use was not a suitable solution (it could not eliminate torque peaks from the engine).

The third vehicle has in the design a four-speed gearbox controlled by four single-acting pneumatic cylinders, Fig. 7.

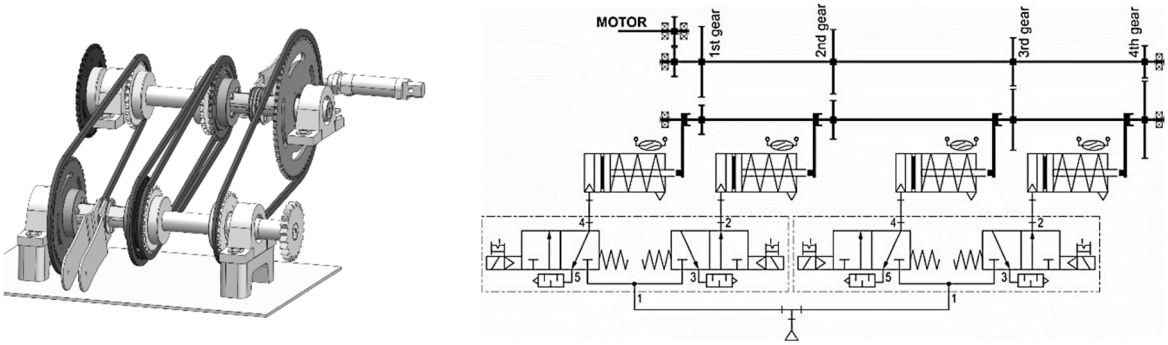


Fig. 7. Four-speed gearbox [5]

Differential

In the case of the first vehicle, a differential was not required, as it was a three-wheeled version of the vehicle with a wheelbase: two at the front without a drive, one driven at the rear.

In the case of the other two vehicles, a simple differential made by modifying the industrial idlers was used, Fig. 8 [4; 9].

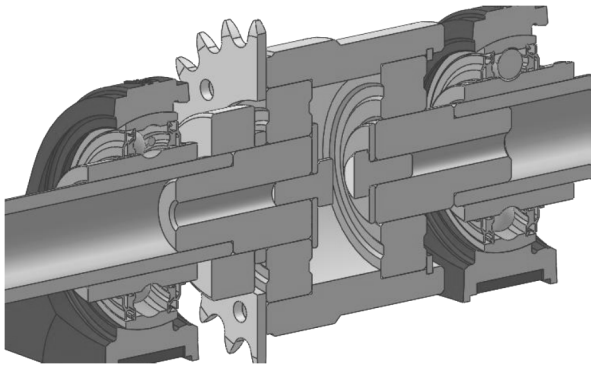


Fig. 8. Simple differential [4]

Conclusions. From the results so far in the competition Aventics/Emerson PNEUMOBILE Competition race can be drawn the following conclusions:

1. On vehicle No. 2 to replace the NuVinci gearbox with a more reliable variant and to test it for individual parameters.
2. Complete and thoroughly test the third vehicle.
3. Evaluate the degree of change of the concept and replacement of unsuitable components on the monitored parameters.

Up to participation in the announced races on time May 13-15, 2021, Eger will show how much the parameters of the registered vehicles have been improved.

Acknowledgement. This article was created thanks to the KEGA project support: 010TUKE-4/2020 - Implementation of new knowledge and innovative approaches to the process of teaching robotics in line with Industry 4.

This article was created thanks to the project support: Research modules for intelligent robotic systems (ITMS: 26220220141) supported by the Research & Development operational Program funded by the ERDF.

References

1. Aventics Hungary Kft.: Announcement and rules, XIII. International Aventics Pneumobile Competition 2020 – powered by Emerson, Available on the Internet: http://en.pneumobil.hu/pneumobile_2020/announcement_and_rules/announcement_and_rules_2020.

2. Demko, M., Tuleja P.: Analyza hnacej sustavy pre vozidlo pohaňane stlačenym vzduchom (Analysis of drive system for a vehicle powered by compressed air). Bachelor thesis. Technical university of Košice, Košice 2018, 50 pp., (in Slovak).
3. Hajduk, M., Tuleja, P.: ZAKLADY PNEUMATICKYCH MECHANIZMOV I.: Vyroba, úprava a rozvod stlačeneho vzduchu a vákua, Technická univerzita v Košiciach, Košice 2013, ISBN 978-80-553-1605-5, (in Slovak).
4. Palko, M., Tuleja, P.: Navrh experimentalneho vozidla pohaňaneho stlačenym vzduchom (Design of an experimental compressed air powered vehicle). Diploma thesis. Technical university of Košice, Košice 2018, 70 pp., (in Slovak).
5. Premkumar, M. A., Palko, M.: Design of Gearbox and Differential of a vehicle for Pneumobile 2020 Project, Bachelor thesis. Technical university of Košice, Košice 2020, 71 pp., (in English).
6. Profile cylinder ISO 15552, Series PRA, Datasheet. Available on the Internet: https://www.aventics.com/pneumatics-catalog/Configuration/?Language=en& Variant=internet&file=en/pdf/PDF_p8771_en.pdf.
7. road.cc. NuVinci: no gears, but all the gears you need?. [online]: <https://road.cc/content/feature/5664-nuvinci-no-gears-all-gears-you-need>
8. Shaimardanov, A.-S., Tuleja, P.: Design of Energy-saving Pneumatic Drive for Pneumobile Project, Bachelor thesis. Technical university of Košice, Košice 2020, 47 pp., (in English).
9. Solárik, R., Jánoš, R.: Návrh motora pre pneumobil 2019 (Design of Engine for Pneumobile 2019), Bachelor thesis. Technical university of Košice, Košice 2019, 71 pp., (in Slovak).
10. https://en.pneumobil.hu/results/results_2019/detailed_results/
11. https://en.pneumobil.hu/results/results_2018/detailed_results/

UDC (07)621.7,621.8

Петер Тулея

АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ ПРИВОДНИХ БЛОКІВ ДЛЯ ПНЕВМОБІЛЬНОГО ПРОЄКТУ

Актуальність теми дослідження. *Сьогодні в автомобільній промисловості існує потреба у створенні альтернативних методів пересування. Стиснене повітря – одна з альтернатив викопному паливу.*

Постановка проблеми. *Щоб перевірити можливості використання стисненого повітря в якості енергії для приведення в рух транспортних засобів, організовується конкурс, на якому представлені команди європейських університетів під егідою компанії, що виробляє пневматичні компоненти. Ми, працівники Інституту автоматики, мехатроніки, виробничих технологій і робототехніки, також двічі брали участь у цьому конкурсі. Підсумки конкурсу, доповнені презентацією ще не реалізованого автомобіля, є предметом цієї статті.*

Аналіз останніх досліджень і публікацій. *Оскільки це аналіз досягнутих результатів, у статті розглядаються шляхи їх досягнення, а не методи наукового характеру.*

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. *Оскільки це оцінка досягнутих результатів, в статті не розглядаються конкретні проблеми теоретичної області. Результати представлені читачеві для ознайомлення і залишають місце для його власної оцінки.*

Постановка завдання. *Мета статті - ознайомити громадськість з результатами дослідження і способами їх досягнення. Це також свого роду запрошення для потенційного співробітництва людей, які цікавляться цим питанням.*

Виклад основного матеріалу. *Основою для створення статті послужили відомості зі студентських робіт, результатами яких були описані автомобілі.*

Висновки відповідно до статті. *Висновки до статті показують проблеми, які мають бути вирішені для подальшого продовження проекту, якщо можливо, з іншими «ентузіастами» в цій галузі, що використовують стиснене повітря для нетрадиційних цілей.*

Ключові слова: *проєкт пневмобіля; аналіз; параметри пневмодвигуна; пневматичні компоненти.*
Рис.: 8. Табл.: 4. Бібл.: 11.

Tuleja Peter – Eng., PhD, Assistant Professor, Technical university in Kosice, Faculty of Mechanical Engineering, Institute of Automatization, Mechatronics, Robotics and Production Systems, Department of Production Systems and Robotics (Komenskeho Park 8, 042 00 Kosice, Slovakia).
E-mail: peter.tuleja@tuke.sk
Scopus Author ID: 55570858300

UDC 621.941-229.3:621.822.172
DOI: 10.25140/2411-5363-2020-3(21)-135-141

Peter Marcinko, Mikuláš Hajduk

AUTOMOBILE POWERED BY COMPRESSED AIR, PNEUMATIC CAR 2020

Urgency of the research. *The issue of a pneumatic car – air car developing is very important nowadays, as the environment is threatened by a variety of emissions from cars. The decision has to be made. There are various alternatives to internal combustion engines, and one of them is compressed air engines.*

Target setting. *The main goal is to develop a car that runs on compressed air and create a frame that matches the dimensions specified for the competition.*

Actual scientific researches and issues analysis. *In recent years, Aventics has organized competitions and races on pneumatic vehicles. These races have been running by Emerson for thirteen years. The pneumatic cars had to take part in all categories of competitions. We have been dealing with this issue in Slovakia for the third year, and this pneumatic car is our third model.*

Uninvestigated parts of general matters defining. *This article describes a car that runs on compressed air, as well as describes in more detail the frame used and its design features.*

The research objective. *The purpose of this study is to analyze the pneumatic vehicle, its parts and to give a detailed description of the manufactured frame and its properties. The corresponding frame was made on the basis of the conditions determined by Emerson's competitions.*

The statement of basic materials. *The analysis was conducted on the basis of the terms of the competition. These conditions are determined by the maximum and minimum dimensions of the car. Based on these conditions, a frame was developed, it was previously analyzed by FEA - MKP. The description of the frame is given below.*

Conclusions. *This article describes the design of a pneumatic car for competitions. The competition focus is cars powered by compressed air. The pneumatic cars were developed by bachelors and technical school. The design of this car has passed the initial inspection and has been approved by the organizers of the competition.*

Keywords: *compressed air; pneumatic car; frame.*
Fig.: 7. References: 10.

Problem definition. The basic concept is based on the rules of the XIII International Competition of Pneumatic Motorists Aventics. This is a competition of students' teams that include future bachelors and engineers. This year the third concept of the pneumatic car has been developed for this competition [1].

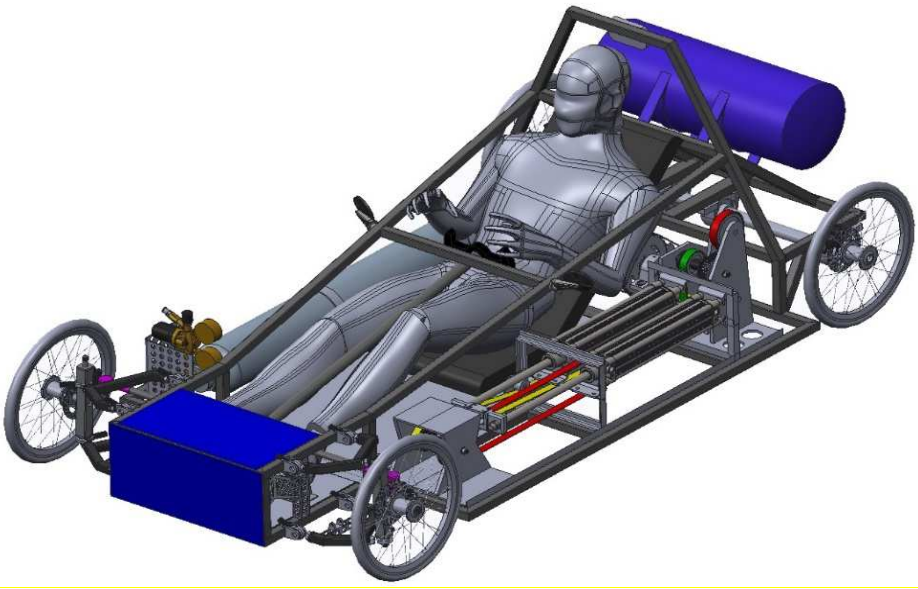


Fig. 1. Designed vehicle – pneumatic car

This model has four wheels as well as two cylinders used as a drive. This type of drive does not produce harmful emissions. The car offered (Fig. 1) can participate in competitions with a restored or new car. This year a new one has been built, the total weight of which does not exceed 90 kg.

© Пітер Марцінко, Мікулаш Гайдук, 2020

The dimensions of this car met the requirements. The maximum length of the car is 2500 mm, and the maximum width is 1700 mm. The height is 90% of the width. The ground clearance between the bottom of the vehicle and the ground must be at least 70 mm. The proposed vehicle with the specified dimensions is shown in Fig. 2.

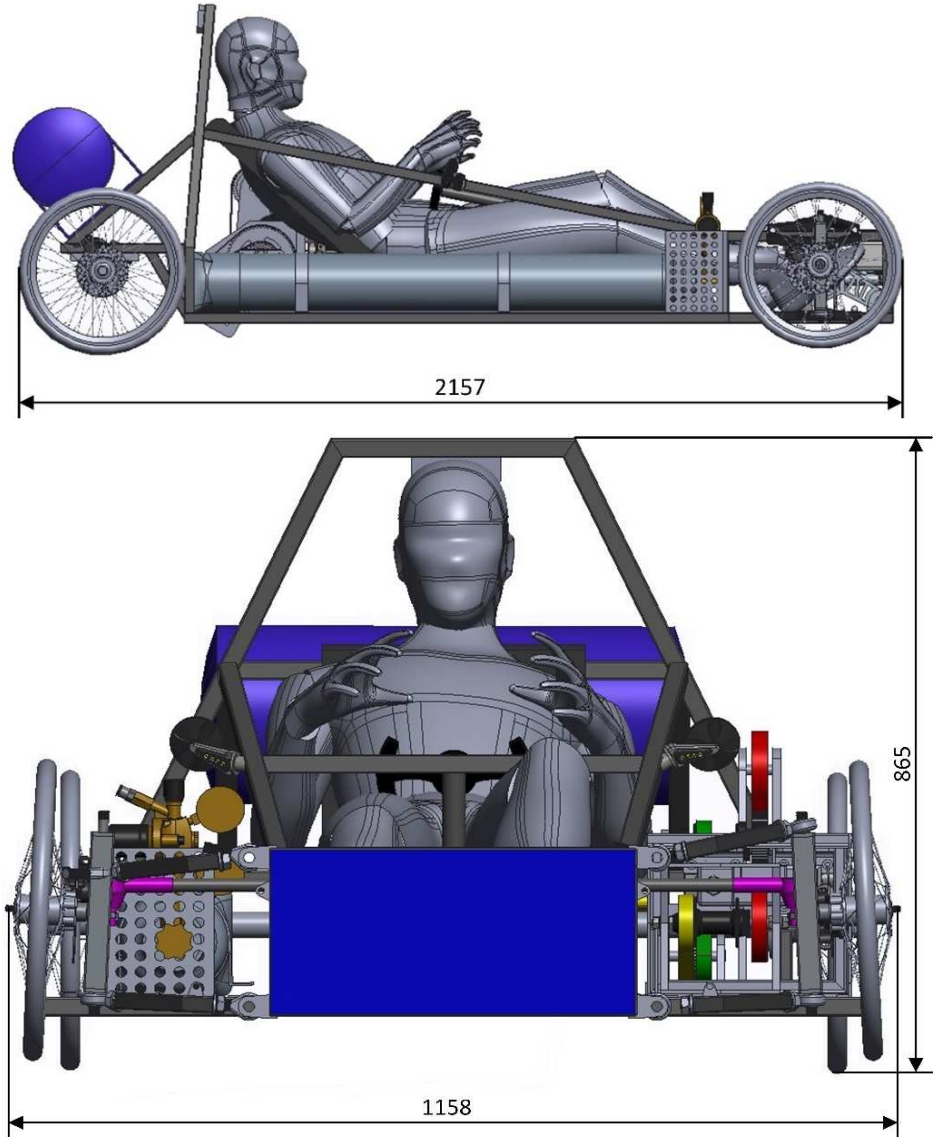


Fig. 2. Pneumatic car with dimensions

This year a concept consisting of a simple design has been proposed. The structure is strong, and a steel profile is chosen as a building material. Last year, three wheels could be used to design the concept. The rules of the competition no longer provide for the concept of three wheels, so the design was developed that now 4 wheels are used. The vehicle designed in this way is more stable in corners [2].

The frame was made of square and rectangular steel profile pipes, as they are easier to work with than round ones. The main structure consists of square pipes measuring 25x25x2 mm, as required by the rules, the load-bearing structures will be made of pipes of different sizes taking into account their purpose [3].

Features of the frame. The car is 2157 mm long, 1158 mm wide and 865 mm high. Approximately 90 kg is the maximum weight of the car. The height of the ground clearance is 90 mm. This new concept is a vehicle that can cover the maximum distance using less compressed

air. We chose a four-wheeled concept with a radius of 16 inches. It was decided to use the engine, which will consist of two air cylinders with a diameter of 63 mm and a piston stroke of 320 mm located on the left side of the car. The driver is located right in the middle of the car. A compressed air tank is installed on the right side of the car. The gearbox is located behind the driver's seat. The engine is controlled by the Arduino Mega 2560 system [4].

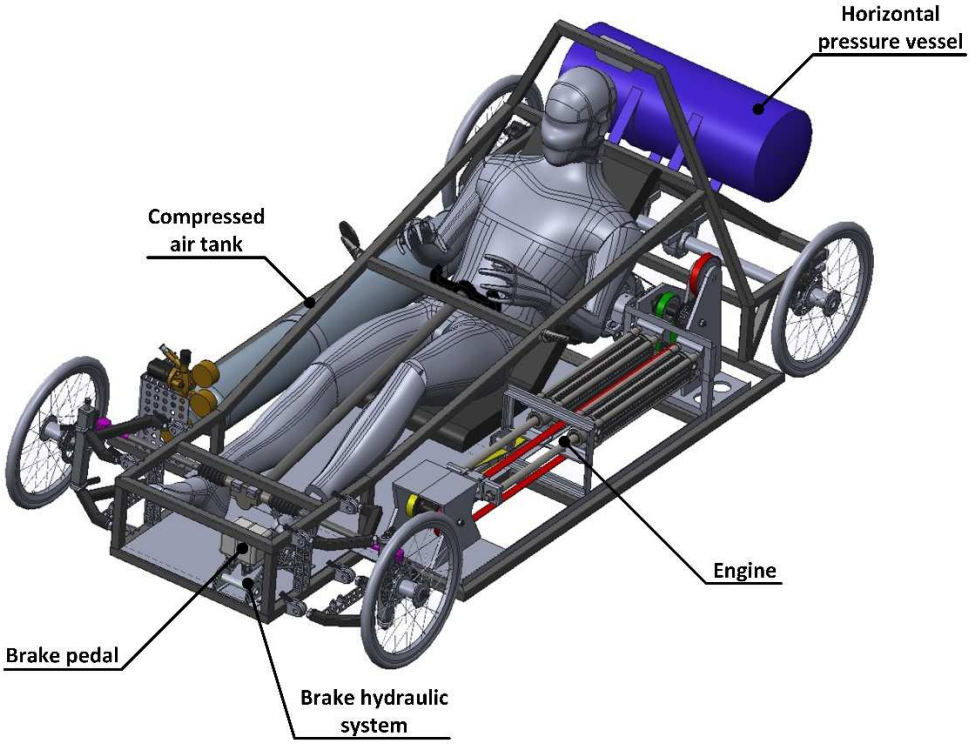


Fig. 3. Pneumatic car and basic parts

In order to meet the conditions of the competition, it was necessary to adhere to the stated dimensions. Since the decision on the concept of four wheels has been made this year, there have been several changes compared to the first concept. The frame can narrow with these changes and thus decreases overall. The driver's seat is located in the middle of the car. The frame of the vehicle serves as a protective frame. The frame created in this way protects the driver even in case of a collision or overturning. The concept was developed for maximum driver protection [5].



Fig. 4. Comparison of the first and third concept

Collision simulations. In the first study, a frontal collision was simulated by applying a force of 10 kN to the front of the frame. The frame showed minimal deformation, and the maximum stress reached only half the yield strength. Carried out simulation of a head-on collision and overturning of the car is shown in Figure 5 [6].

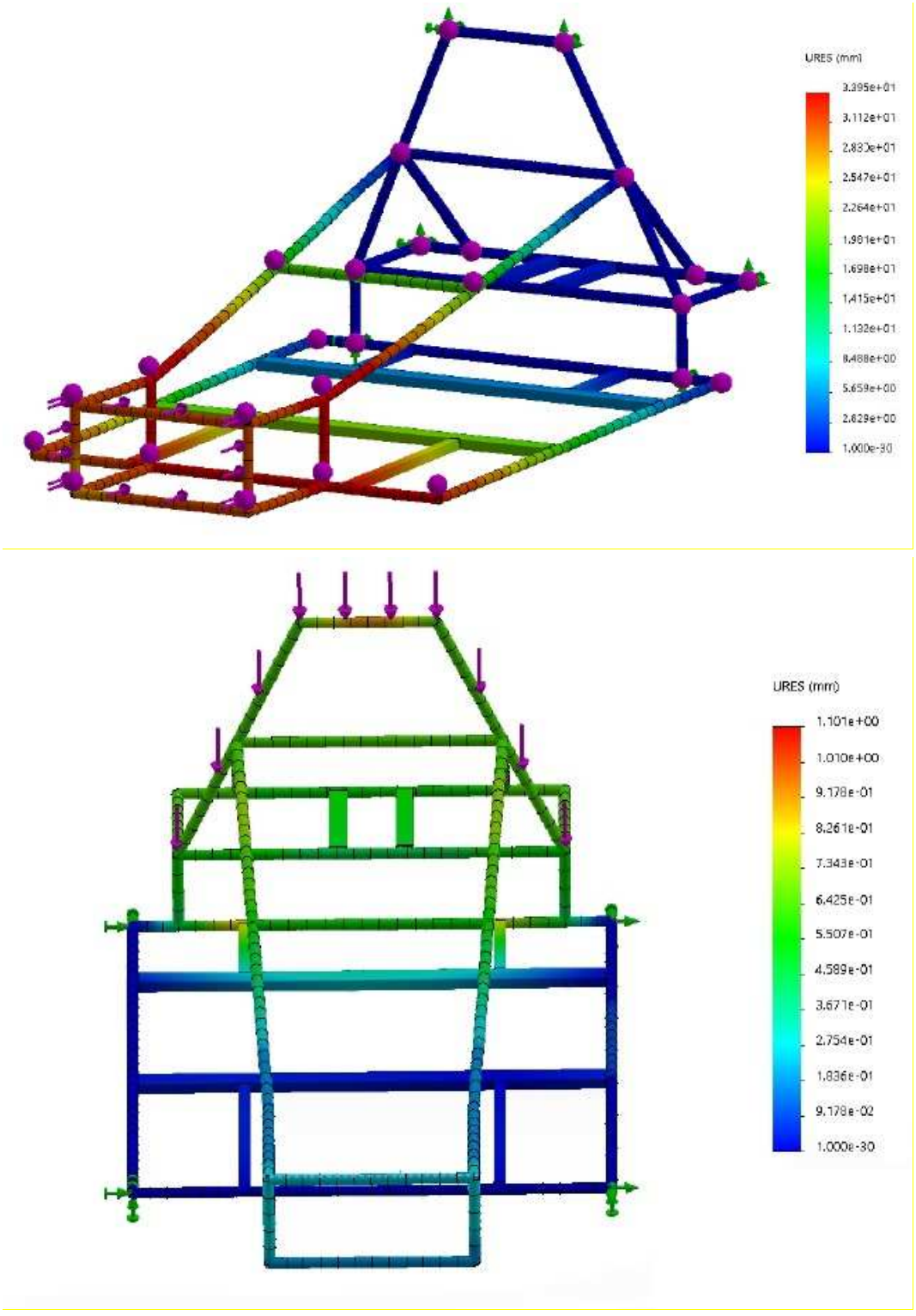


Fig. 5. Simulation of the frame

The front axle is sprung, the rear axle is stationary. The ground clearance of the front axle varies from 80 mm to 94 mm during the suspension, the rear axle has a fixed clearance of 94 mm [7]. **Control system of vehicle.** This vehicle uses two linear cylinders. The cylinders are connected by a belt. This engine is designed by Arduino - Mega. The whole system is powered by a lithium-polymer battery 6S - 1 P, 24 V with a capacity of 10,000 mAh [8].

The diagrams start by checking the emergency stop button (SBE). After that, if the emergency stop button is on, the system will stop and both cylinders will be empty, if the emergency stop button is off, the system will continue to operate. After applying the power to the Arduino-Mega controller, the driver must adjust the settings on the display. After that, the Arduino Mega controller reads the signal on all sensors. Then all values are shown on the display. The system continues to check the brakes. If the brakes are on, both cylinders (C1, C2) will go out and the brake lamp will light up. Otherwise the system continues to check the accelerator pedal, the brake light will go out. If the accelerator pedal is switched off, the air supplied to both cylinders will be switched off. If the pedal is on, the system continues to check the mode. If the signal from the ST6 sensor is correct and the signal from the ST6 sensor is incorrect, then the pistons are pushed out. If the signal from the ST6 sensor is incorrect, but the signal from the ST6 sensor is correct, then the pistons are retracted into the cylinder. Then the cycle repeats.

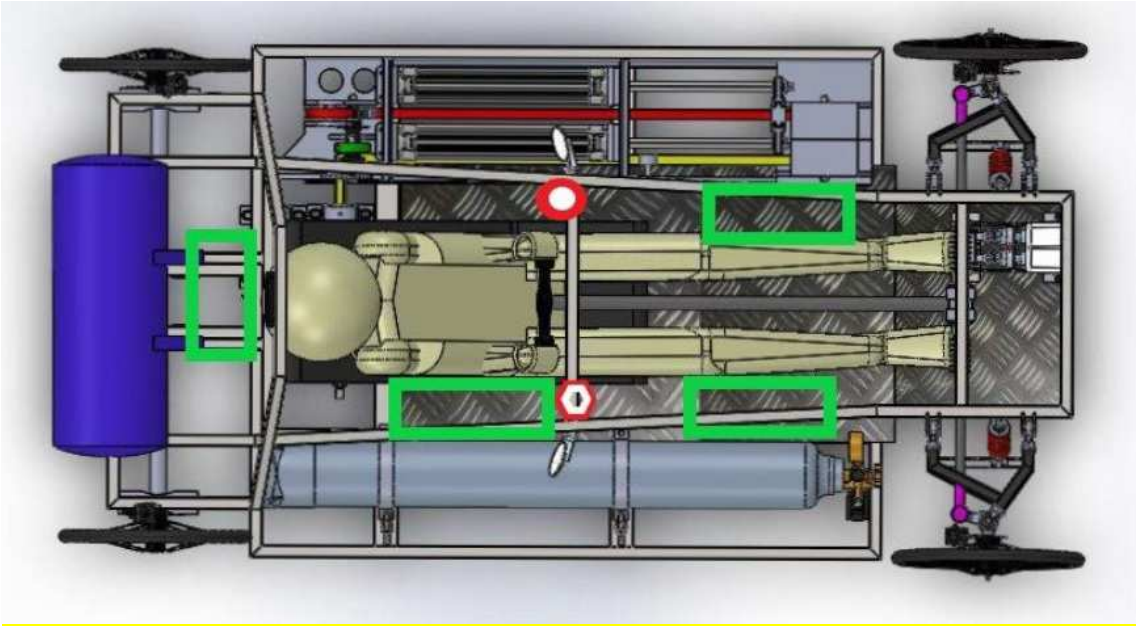


Fig. 6. Planned position of electrical parts

The electrical cabinet will be located in one of the positions marked by orange rectangles, the exact position will be selected when assembling the car with an emphasis on safety, weight distribution, cable management and the driver comfort. The cabinet will provide the required level of protection IP54 or better. The planned position of the pneumatic safety switch is marked with a red circle. The planned position of the electric safety-stop is marked by a red hexagon [9].

In the following Figure. 7 is shown the concept. The first two concepts also participated in the competition [10].



Fig. 7. Designed pneumatic cars in last three years

Conclusions. For the last three years the Department of Robotics has taken an active part in the international competition in pneumatic vehicles. This year the students have created the third concept of the pneumatic car. The first two concepts also took an active part in the competition. The last concept of the pneumatic car has been developed on the basis of the experience gained for the first two years.

This article describes one of the main parts of a pneumatic vehicle. The car has been designed to meet the requirements of the competition. One of the main parts of the vehicle design is the modeling of the frame to ensure safety requirements in case of accidents. As this car is a students' project, it could not be completed due to the ongoing Covid-19 pandemic. This proposed vehicle will be built soon when students return to the department.

Acknowledgements. This article was created with the support of the project KEGA: 010TUKE-4/2020 - Introduction of new knowledge and innovative approaches to the process of robotics training in accordance with Industry 4.

References

1. Retrieved from *https://en.pneumobil.hu/pneumobile_2020/announcement_and_rules.*

2. Hajduk, M., Tuleja, P. "*Základy pneumatických mechanizmov I.: Výroba, úprava a rozvod stlačeného vzduchu a vákua"*, Technická univerzita v Košiciach, Košice 2013, ISBN 978-80-553-1605-5.

3. Palko, M.: *Návrh experimentálneho vozidla poháňaného stlačeným vzduchom.* Technická univerzita v Košiciach. Košice 2018.

4. Lesiv, I.: *Návrh elektropneumatického riadenia úsporného pohonu pre projekt Pneumobil*. Technická univerzita v Košiciach. Košice 2020.

5. Shaimardanov, A.-S.: *Návrh úspornej pneumatickej pohonovej jednotky pre projekt Pneumobil*. Technická univerzita v Košiciach. Košice 2020.

6. Marcinko, P., Palko, M., Hajduk, M.: *Automobile with pneumatic engine*. 2018. In: Technical Sciences and Technologies. - Černihiv (Ukrajina): Chernihiv National University of Technology Roč. 13, č. 3 (2018), s. 55-60 [print]. ISSN 2411-5363.

7. Horvat, O.: *Návrh podvozkovej skupiny pre long-distance disciplínu v projekte Pneumobil*. Technická univerzita v Košiciach. Košice 2020.

8. https://store.arduino.cc/arduino-mega-2560-rev3.
9. Solárik, R.: *Návrh motora pre pneumobil 2019*. Technická univerzita v Košiciach. Košice 2019.
10. Retrieved from *https://kosicednes.sk/zaujimavosti/strojari-z-tuke-vyrobili-prve-slovenske-auto-na-stlaceny-vzduch.*

UDC 621.941-229.3:621.822.172

Пітер Марцінко, Мікулаш Гайдук

АВТОМОБІЛЬ НА СТИСНЕНОМУ ПОВІТРІ, ПНЕВМОБІЛЬ 2020

Актуальність теми дослідження. *Проблема розробки пневмомобіля є дуже актуальною, оскільки сьогодні навколишньому середовищу загрожують різні викиди, вироблені автомобілями. Необхідно знайти її рішення. В даний час вже існують різні альтернативи двигунам внутрішнього згорання, і одна з них – це двигуни, що працюють на стиснутому повітрі.*

Постановка проблеми. *Основна мета - створити автомобіль, що працює на стисненому повітрі. Першочергова мета - створити рамку, що відповідає розмірам, визначеним змаганнями.*

Аналіз останніх досліджень і публікацій. *В останні роки компанія Aventics організовувала змагання з перегонів на пневмомобілях. Протягом останніх тринадцяти років і до тепер ці перегони очолює компанія Emerson. Цей автомобіль мав бути представленим у всіх номінаціях конкурсу. Ми займаємося цією проблемою в Словаччині вже третій рік, і це наша третя модель.*

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. *У цій статті описується автомобіль, який приводиться в рух стисненим повітрям, і більш детально описується використана рама та її особливості.*

Постановка завдання. *Метою даного дослідження є аналіз пневмомобіля, його частин і деталей, опис виготовленої рами і її властивостей. Відповідна рама була виготовлена за умов, визначених конкурсом Emerson.*

Виклад основного матеріалу. *Аналіз проводиться виходячи з умов конкурсу. Ці умови визначаються максимальними і мінімальними габаритами автомобіля. Виходячи з цих умов, була спроектована рама та попередньо піддана аналізу FEA - МКР. Опис корпусу наведено нижче.*

Висновки відповідно до статті. *У цій статті описується конструкція пневмомобіля для змагань. Змагання орієнтовані на автомобілі, що працюють на стиснутому повітрі. Ці пневмомобілі розробляються бакалаврами і студентами інженерних спеціальностей. Конструкція цього автомобіля пройшла первинний огляд, який схвалили організатори конкурсу.*

Ключові слова: *стиснене повітря; пневмобіль; рама.*
Рис.: 7. Бібл.: 10.

Peter Marcinko – assistant professor, Technical university in Kosice, Faculty of Mechanical Engineering, Institute of Automatization, Mechatronics and Robotics, Department of Robotics, (Komenskeho Park 8, 042 00 Kosice, Slovakia).
SCOPUS Author ID: 57200138054
E-mail: peter.marcinko@tuke.sk

Mikulas Hajduk – prof., Eng., PhD, Professor, Technical university in Kosice, Faculty of Mechanical Engineering, Institute of Automatization, Mechatronics and Robotics, Department of Robotics, (Komenskeho Park 8, 042 00 Kosice, Slovakia).
Scopus Author ID: 35826618400
E-mail: mikulas.hajduk@tuke.sk

Marcinko P., Hajduk M. (2020). Automobile powered by compressed air, pneumobil 2020. *Technical sciences and technologies*, *3*(21), pp. 135-141.

РОЗДІЛ ІІ. ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 004.8:004.89:519.7
DOI: 10.25140/2411-5363-2020-3(21)-142-153

Ігор Повхан

ПИТАННЯ СКЛАДНОСТІ ПРОЦЕДУРИ ПОБУДОВИ СХЕМИ АЛГОРИТМІЧНОГО ДЕРЕВА КЛАСИФІКАЦІЇ

Актуальність теми дослідження. *На сучасному етапі розвитку інформаційних систем та технологій, які базуються на математичних моделях теорії штучного інтелекту (методах та схемах алгоритмічних дерев класифікації), виникає принципова проблема вузької спеціалізації наявних підходів та методів у соціально-економічних, екологічних та інших системах первинного аналізу та обробки великих масивів інформації. Задачі, які об'єднуються тематикою розпізнавання образів, дуже різноманітні та виникають у сучасному світі в усіх сферах економіки та соціального контенту діяльності людини, що приводить до необхідності побудови та дослідження математичних моделей відповідних систем. На сьогодні немає універсального підходу до їх розв'язання, запропоновано декілька досить загальних теорій та підходів, що дозволяють вирішувати багато типів (класів) задач, але їх прикладні застосування відрізняються досить великою чутливістю до специфіки самої задачі або предметної області застосування. Представлена робота присвячена проблемі моделей логічних та алгоритмічних дерев класифікації (схем ЛДК/АДК), пропонує оцінку складності структур алгоритмічних дерев (моделей дерев класифікації), які складаються з незалежних та автономних алгоритмів класифікації і будуть являти собою певною мірою новий алгоритм розпізнавання (зрозуміло, що синтезований із відомих схем, алгоритмів та методів).*

Постановка проблеми. *Нині актуальні різні підходи до побудови систем розпізнавання у вигляді дерев класифікації (ЛДК/АДК), причому інтерес до методів розпізнавання, які використовують дерева класифікації, викликаний багатьма корисними властивостями, якими вони володіють. З одного боку, складність класу функцій розпізнавання у вигляді моделей дерев класифікації, при визначених умовах, не перевищують складності класу лінійних функцій розпізнавання (простішого з відомих). З іншого – функції розпізнавання у вигляді дерев класифікації дозволяють виділити в процесі класифікації як причинно-наслідкові зв'язки (та однозначно врахувати їх у подальшому), так і фактори випадковості або невизначеності, тобто врахувати одночасно і функціональні, і стохастичні відношення між властивостями та поведінкою всієї системи. При цьому відомо, що процес класифікації нових, таких, що досі не зустрічалися, об'єктів світу багатьох тварин і людей (за винятком об'єктів, інформація про які передається генетичним шляхом (наслідковим), а також в деяких інших випадках), відбувається за так званим логічним деревом рішень (у зв'язку з нейромережевою концепцією). Зрозуміло, що доцільно не розробляти новий алгоритм, а запропонувати деяку концепцію раціонального використання вже накопиченого потенціалу алгоритмів та методів класифікації у вигляді моделей алгоритмічних дерев класифікації (структур АДК). Саме тому ця робота має намір хоча б частково подолати ці обмеження та присвячена оцінці складності процедури побудови моделей алгоритмічних (логічних) дерев класифікації в галузі задач розпізнавання.*

Аналіз останніх досліджень і публікацій. *У дослідженні розглянуті останні наукові публікації у відкритому доступі, які присвячені загальній проблемі підходів, методів, алгоритмів та схем розпізнавання (моделей ЛДК/АДК) дискретних об'єктів (дискретних зображень) у задачах розпізнавання образів (теорії штучного інтелекту).*

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. *Можливість простого та економного методу побудови моделі алгоритмічного дерева класифікації (або структур АДК/ЛДК) та оцінка складності такої процедури (моделі структури АДК/ЛДК) на основі початкових масивів дискретної інформації великого об'єму.*

Постановка завдання. *Дослідження актуального питання складності загальної процедури побудови алгоритмічного дерева класифікації (моделі АДК) на основі концепції поетапної селекції наборів незалежних алгоритмів класифікації (можливих їх різнотипних множин та сполучень), яке для заданої початкової навчальної вибірки (масиву дискретної інформації) будує деревоподібну структуру (модель класифікації АДК), з набору алгоритмів оцінених на кожному кроці схеми побудови моделі за даною початковою вибіркою.*

Виклад основного матеріалу. *Пропонується оцінка складності процедури побудови алгоритмічного дерева класифікації для довільного випадку (для умов слабкого та сильного розділення класів навчальної вибірки). Розв'язок цього питання має принциповий характер, щодо питань оцінки структурної складності моделей класифікації (у вигляді деревоподібних конструкцій), структур АДК дискретних об'єктів для широкого класу прикладних задач класифікації та розпізнавання в плані розробки перспективних схем та методів їх фінальної оптимізації (мінімізації) конструкції. Це дослідження має актуальність не лише для конструкцій алгоритмічних дерев класифікації, але й дозволяє розширити саму схему оцінки складності і на загальний випадок структур логічних дерев класифікації.*

Висновки відповідно до статті*. Досліджені питання структурної складності конструкцій ЛДК/АДК, запропонована верхня оцінка складності для процедури побудови алгоритмічного дерева класифікації в умовах слабкого та сильного розділення класів початкової навчальної вибірки.*

Ключові слова*: задачі розпізнавання; алгоритмічне дерево; схема розпізнавання; складність дерева класифікації; дискретна ознака; узагальнена ознака; алгоритм класифікації.*

Рис.: 3. Бібл.: 23.

© Повхан І. Ф., 2020

Актуальність теми дослідження. Сучасні інформаційні системи та технології, які концептуально базуються на моделях розпізнавання (класифікації) образів у вигляді структур ЛДК/АДК (моделей логічних дерев класифікації, алгоритмічних дерев класифікації), широко використовуються в соціально-економічних, екологічних та інших системах аналізу та обробки інформації. Нині фактично немає універсального підходу або концепції до їх вирішення, але запропоновано набір досить загальних теорій та підходів, що дозволяють вирішувати багато типів (класів) прикладних задач. Їх безпосереднє застосування відрізняється досить великою чутливістю до специфіки задачі або предметної галузі застосування [1-7]. Зазначимо, що багато теоретичних результатів отримано для спеціальних випадків та підзадач. Причому вузьким місцем вдалих реальних систем розпізнавання залишається необхідність виконання величезного об'єму обчислень та орієнтація на потужний апаратний інструментарій. Проте велика кількість прикладних задач, у різних галузях природознавства, де вирішуються задачі класифікації з використанням програмних та апаратних систем, визначає інтенсивність та актуальність такого напряму досліджень [8]. Зауважимо, що галузь застосування концепції дерев рішень нині надзвичайно об'ємна, а множина задач та проблем, які вирішуються цим апаратом, може бути зведена до задачі опису структур даних, задачі розпізнавання та класифікації, задачі регресії [9-11]. Саме загальним питанням структурної складності конструкцій АДК у розрізі процедури їх генерації і буде присвячена дана робота.

Постановка проблеми. Нехай на деякій множині G дискретних об'єктів (сигналів) x задане розбиття R на скінчене число k підмножин (класів, образів) $H_i(i = 1, \dots, k)$, $G = \bigcup_{i=1}^{k} H_i$. Відповідні множини $H_1, \dots, H_k$ будемо називати образами, а елементи множини $G -$ зображеннями або представниками образів (класів) $H_1, \dots, H_k$. Об'єкти (зображення) x задаються наборами значень деяких ознак $x_j(j = 1, \dots, n)$. Якщо $x \in H_i$ то будемо рахувати, що даний об'єкт належить образу H_i. Загалом образи $H_1, \dots, H_k$ можуть бути задані імовірнісними розподілами $p(H_1/x), \dots, p(H_k/x)$, де $p(H_i/x)$ – імовірність (або в неперервному випадку щільність імовірності) належності $x(x \in H_i)$ образу H_i. Нехай початковою умовою задачі задана деяка фіксована НВ у вигляді послідовності навчальних пар наступного вигляду:

$$\big(x_1, f_R(x_1)\big), \dots, (x_m, f_R(x_m)). \quad (1)$$

Причому, крім початкової НВ, задана також ТВ (тестова вибірка – набір об'єктів відомої класової належності), як деяка частина початкової НВ. Отже, за початковою умовою НВ – це сукупність (фіксована послідовність) деяких наборів (дискретних об'єктів), причому кожний набір – це сукупність значень деяких ознак (атрибутів) та значень деяких функцій розпізнавання (ФР) на цьому наборі. Тоді сукупність значень ознак – це деяке зображення (дискретний об'єкт), а значення функції (ФР) відносить це зображення до відповідного образу [12]. Таким чином, зазвичай стоїть загальна задача побудови моделі АДК з набором деяких параметрів p, структура L якої була би оптимальною $F(L(p, x_i), f_R(x_i)) \to opt$ щодо початкових даних НВ, причому нас у цьому дослідженні буде цікавити складність такої структури на етапі побудови моделі АДК.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження продовжує цикл робіт, які присвячені проблемі деревоподібних схем розпізнавання (моделей дерев класифікації) дискретних об'єктів [12-14; 17-21]. У них порушуються питання побудови, використання та оптимізації структур дерев класифікації. Так, з [4] відомо, що результуюче правило класифікації (схема), яке побудоване довільним методом або алгоритмом розгалуженого вибору ознак, має деревоподібну логічну структуру. Причому логічне дерево складається з вершин (ознак, атрибутів), які групуються по ярусах і які отримані на певному кроці (етапі) побудови дерева розпізнавання [5]. Важливою задачею, яка виникає з [8], є задача синтезу

дерев розпізнавання, які будуть представлятися фактично деревом (графом) алгоритмів (методи АДК). На відміну від існуючих методів, головною особливістю деревоподібних систем розпізнавання є те, що важливість окремих ознак (групи ознак чи алгоритмів) визначається відносно функції, яка задає розбиття об'єктів на класи [12]. Так в роботі [7] піднімаються принципові питання стосовно генерації дерев рішень для випадку малоінформативних ознак, питання оцінки якості побудованих моделей. Здатність структур дерев класифікації виконувати одномірне розгалуження (вибір ознак, атрибутів) для аналізу впливу (важливості, якості) окремих змінних (вершин) дає можливість працювати зі змінними різних типів у вигляді предикатів, узагальнених ознак, для випадку АДК – відповідними автономними алгоритмами класифікації та розпізнавання. Така концепція дерев класифікації активно використовується в інтелектуальному аналізі даних, де кінцева мета полягає в синтезі моделі (фіксованої схеми), яка прогнозує значення цільової змінної на основі набору початкових даних (масивів даних НВ) на вході системи [11].

Так, насьогодні в прикладній площині існує значна кількість алгоритмів, які реалізують концепцію дерев рішень (дерев класифікації), але найбільшого вживання та розповсюдження отримали два їх представника (C4.5/C5.0 та CART). Причому згаданий вище алгоритм логічного дерева C5.0, як критерій відбору вузла (вершини), використовує так званий теоретико-інформаційний критерій. А алгоритм CART базується на розрахунку індексу Gini, який враховує відносні відстані (у межах метрики) між розподілами класів [15].

Оскільки головну ідею методів та алгоритмів розгалуженого вибору ознак (вершин алгоритмів) АДК можна визначити як оптимальну апроксимацію деякої початкової НВ набором ранжованих алгоритмів класифікації (ознак, атрибутів об'єкту у випадку ЛДК), то на перший план виходить центральне питання – задача вибору ефективного критерію розгалуження (відбору вершин, атрибутів, ознак дискретних об'єктів для ЛДК та алгоритмів для АДК). Саме ці принципові задачі розглядаються в [19], де порушуються питання якісної оцінки окремих дискретних ознак, їх наборів та фіксованих сполучень, що дозволяє запровадити ефективний механізм реалізації розгалуження.

Мета роботи. Метою цієї роботи є верхня числова оцінка складності структури побудованого алгоритмічного дерева класифікації, що забезпечує швидку та якісну схему класифікації дискретних об'єктів у задачах штучного інтелекту.

Виклад основного матеріалу. На цьому етапі дослідження розглянемо принципове питання методів дерев класифікації (моделей класифікації) – питання загальної складності процедури побудови дерева класифікації (методів дерев класифікації). Отже, припустимо, що маємо справу з початковою НВ вигляду (1), яка представлена сукупністю навчальних пар відомої класифікації. Зауважимо, що тут НВ є детермінованою, тобто для неї буде виконуватися така умова:

$$If\ \left(x_k, f_R(x_k)\right)\ and\ \left(x_l, f_R(x_l)\right),\ x_k \neq x_l\ then\ f_R(x_k) \neq f_R(x_l). \quad (2)$$

Випадок ЛДК. Нехай на кожному кроці в процесі побудови логічного дерева (деякої моделі ЛДК) буде вибиратися лише одна відібрана елементарна ознака з набору фіксованих ознак $(\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n)$. Тоді на $n-$ товому кроці процедури побудови дерева класифікації схема ЛДК буде являти собою деякий предикат p_n (узагальнену ознаку, яка побудована з набору елементарних ознак) [20], який є найбільш ефективною апроксимацією початкової НВ загального вигляду (1) (безперечно, це справедливо і для випадку структури АДК).

Зауважимо, що тут p_n буде являти собою деяку деревоподібну схему (дерево класифікації), яке складається з n вершин, тобто в структуру предикату p_n будуть входити всього n елементарних ознак (атрибутів дискретного об'єкта НВ) із початкового набору.

Зауважимо, що послідовність предикатів $p_1, p_2, \dots, p_j$ (узагальнених ознак) збігається до початкової НВ вигляду (1), якщо починаючи з деякого Q, буде виконуватись умова:

$$f_{Q+m} = f_R(x_i), (i = 1,2, \dots, m), (m \geq 0). \quad (3)$$

Деяка елементарна ознака, яка буде вибиратися (фіксуватися) на $n-$ товому кроці в схемі побудови моделі ЛДК, позначимо через φ_n. Зрозуміло, що ознаці φ_n відповідає деякий фіксований шлях $r_1, r_2, \dots$, який закінчується цим атрибутом (вершиною дерева класифікації – моделі ЛДК). Наприклад, на рис. 1 зображено ЛДК, в якому вершині φ_2 (ознаці) відповідає шлях $\{0\}$, а вершині φ_5 – шлях $\{0,1\}$.

Шлях, який відповідає елементарній ознаці φ_n вказаним чином, позначимо через T_n, а через D_n позначимо множину тих пар $\left(x_i, f_R(x_i)\right)$ початкової НВ загального вигляду (1), для яких об'єкти w_i належать шляху T_n. Наприклад, для структури ЛДК (рис. 1), нехай $\varphi_n = \varphi_4$, тоді шлях T_n буде мати вигляд $\{1,0\}$.

У такому випадку деякий об'єкт w_i належить шляху $\{1,0\}$, якщо виконуються умови $\varphi_1(w_i) = 1$ та $\varphi_3(w_i) = 0$.

Далі будемо вважати, що елементарна ознака φ_n слабо розділяє множину D_n, якщо в D_n існують такі пари $\left(x_i, f_R(x_i)\right)$ та $\left(x_j, f_R(x_j)\right)$, що $\varphi_n(x_i) = 0$ та $\varphi_n(x_j) = 1$ (тобто $\varphi_n(x_i) \neq \varphi_n(x_j)$).

На наступному етапі дослідження введемо поняття кінцевої потужності схеми методу дерева класифікації.

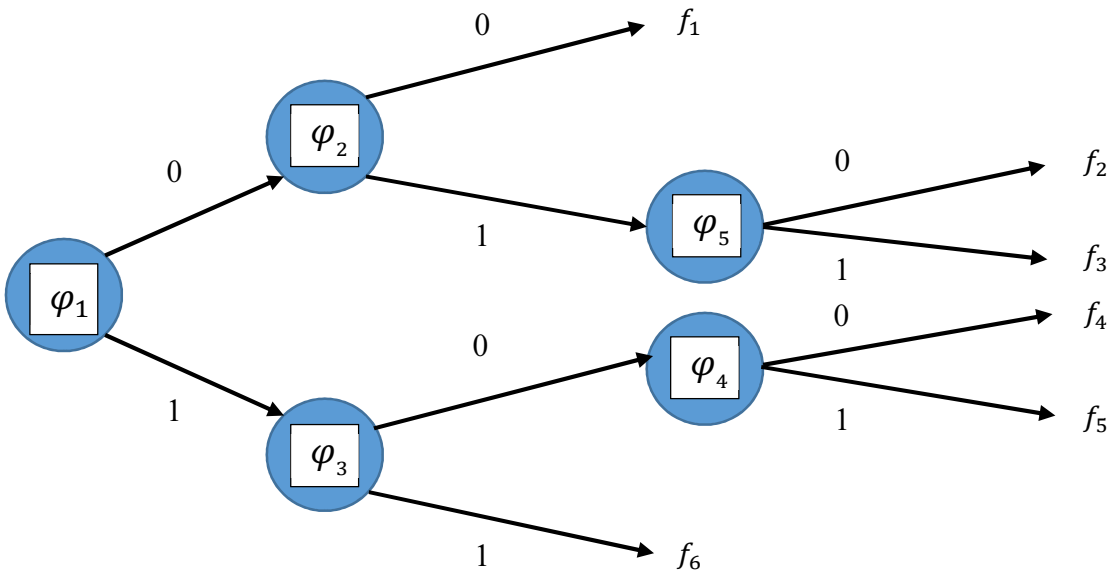


Рис. 1. Приклад структури ЛДК з елементарними ознаками в ролі вершин

Визначення 1. Під кінцевою потужністю схеми методу дерева класифікації (моделей ЛДК/АДК) будемо рахувати кількість усіх кінцевих вершин (визначених листів) цієї схеми. Наприклад, для ЛДК з (рис. 1) кінцева потужність буде дорівнювати 6.

Очевидно, що кінцева потужність схеми методу дерева класифікації також дорівнює кількості всіх кінцевих шляхів в даній схемі. Зрозуміло, що індукцією за n легко довести, що кінцевою потужністю кожної з вищесказаних схем p_n (предикатів), дорівнює $n + 1$. Дійсно, те, що кінцева потужність p_1, до складу якого входить тільки одна ознака або алгоритм (випадків ЛДК/АДК) дорівнює 2, є очевидним.

Нехай кінцева потужність схеми p_n дорівнює $n+1$. Підрахуємо кінцеву потужність p_{n+1}. Зрозуміло, що ця схема будується на основі схеми p_n, коли в деякій кінцевій вершині послідовно додається нова вершина (ознака, алгоритм) з номером $n+1$. Очевидно, що при додаванні цієї ознаки (алгоритму) у схему p_n зникає одна кінцева вершина та додаються дві нові кінцеві вершини. Отже, можна зробити висновок, що кількість усіх кінцевих вершин схеми p_n дорівнює $n+2$.

Припустимо, що на кожному n-вому кроці процедури побудови дерева класифікації (моделі ЛДК) множина D_n слабо розділяється деякою ознакою φ_n. Далі розглянемо схему p_n. У цій схемі маємо відповідно вищесказаному, $n+1$ кінцевих шляхів. Завдяки тому, що D_n на кожному кроці слабо розділяється, кожний такий шлях містить хоча б одну пару початкової НВ загального вигляду (1). Крім того, очевидно, що різні кінцеві шляхи в p_n не мають спільних пар із вибірки (1).

Отже, можна зробити висновок, що схема (предикат) p_n розділяє НВ (на основі базового критерію розгалуження введеного поточним методом дерева класифікації) на $n+1$ непустих частин (підмножин), що не перетинаються. Оскільки в початковій НВ усього знаходиться m навчальних пар, то схема p_{m-1} (або предикат із меншим номером) повністю розділить початкову НВ, тобто p_{m-1} буде повністю розпізнавати вибірку.

Таким чином, якщо на кожному n-вому кроці відібрана елементарна ознака φ_n слабо розділяє множину D_n, то в цьому випадку процес побудови ЛДК збігається відносно початкової НВ та закінчується не більше за $m-1$ кроків, де $m-$ кількість усіх навчальних пар початкової НВ.

Зауважимо, що умова слабого розділення класів є доволі слабою – тому вона забезпечує невисоку збіжність процедури побудови дерева класифікації, отже, важливо розглянути питання збіжності процесу при більш сильній умові. Тому будемо припускати, що маємо справу з випадком, коли НВ містить інформацію про два класи (образи) H_0 та H_1, а сама НВ має детерміновану природу. Нехай n_j- кількість навчальних пар $\left(x_i, f_R(x_i)\right)$ у початковій НВ, які задовольняють співвідношенню $f_R(x_i)=j, (j=0{,}1)$, причому для спрощення та визначеності покладемо, що $n_0 \geq n_1$.

Зафіксувавши $f_R(x) \equiv 0$, буде отримано деяку узагальнену ознаку (схему) f_0, яка апроксимує (повністю або частково) початкову НВ. Очевидно, що в цьому випадку (тобто в ситуації, коли ще не зроблено вибір жодної елементарної ознаки φ_n) узагальнена ознака (схема) f_0 є найкращою апроксимацією початкової НВ. Далі величину n_1 будемо називати безумовною кількістю помилок у початковій НВ.

Нехай на першому кроці побудови дерева класифікації відібрана (довільним шляхом) деяка елементарна ознака φ_1 – причому ця ознака розіб'є початкову вибірку на дві частини (підмножини) H_0 та H_1, де H_j- множина всіх пар $\left(x_i, f_R(x_i)\right)$ початкової НВ, для яких виконується співвідношення $f_1(x_i)=j, (j=0{,}1)$.

Нехай n_m^j- множина всіх пар $\left(x_i, f_R(x_i)\right)$ з вибірки $H_j, (j=0{,}1)$, для яких виконується співвідношення $f_R(x_i)=m, (m=0{,}1)$. Ознаку φ_1 можна рахувати узагальненою ознакою f_1 (схемою), яка побудована на першому кроці процесу побудови ЛДК.

Введемо величину $\rho=\max(n_0^0, n_1^0)+\max(n_0^1, n_1^1)$, яка являє собою кількість правильних відповідей (класифікацій), які реалізуються узагальненою ознакою f_1, а відповідно величина n_0- являє собою кількість правильних відповідей (класифікацій), які реалізуються узагальненою ознакою f_0.

Під кількістю правильних відповідей розуміємо кількість тих навчальних пар $\left(x_i, f_R(x_i)\right)$ у початковій навчальній виборці типу (1), для яких виконується співвідношення рівності $f_R(x_i)=f_1(x_i)$.

Оскільки $n_0^0 + n_0^1 = n_0$ та $n_1^0 + n_1^1 = n_1$, то

$$\rho = \max(n_0^0, n_1^0) + \max(n_0^1, n_1^1) \geq n_0. \quad (4)$$

Таким чином, при виборі ознаки φ_1 кількість правильних відповідей як мінімум не зменшується. Кількість помилок, які дає узагальнений алгоритм f_1, буде дорівнювати:

$$m - \rho = n_1 - (\rho - n_0) \leq n_1. \quad (5)$$

Зауважимо, що (5) випливає з (4). Введемо величину $\lambda_1 = \frac{n_1}{m-\rho}$ та назвемо її якістю елементарної ознаки φ_1 відносно початкової НВ, аналогічно визначається λ_n ознаки φ_n відносно початкової НВ $(n = 1,2,3, \dots)$.

На наступному етапі дослідження зробимо таке припущення – якість λ_n елементарної ознаки φ_n відносно масиву початкової НВ не менше, ніж деяке число y, де $y > 1$.

Проаналізуємо складність процедури побудови дерева класифікації за цієї умови $(y > 1)$, для цього оцінимо кількість кроків, за якими цей процес (процедура) реалізує повне розпізнавання масиву початкової навчальної вибірки.

Розглянемо для визначеності наступну схему побудови дерева класифікації (рис. 2).

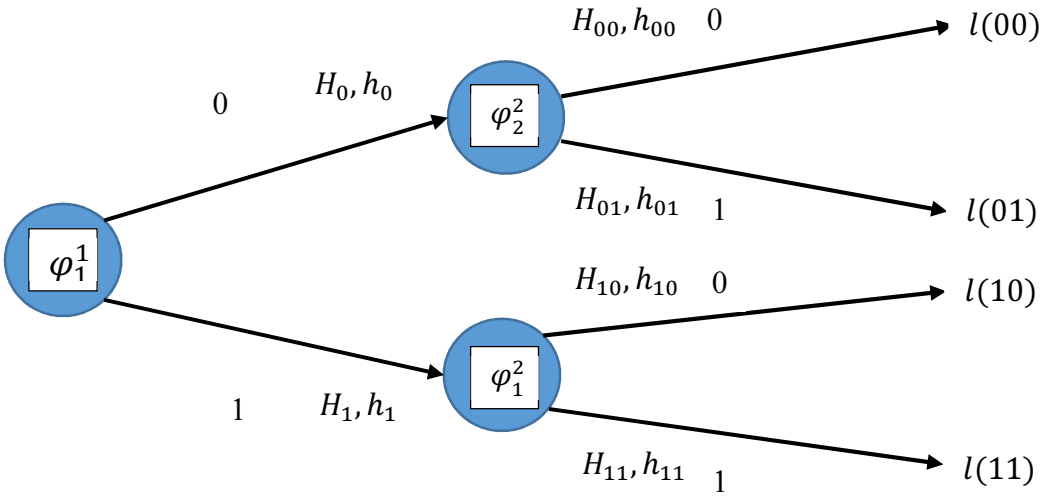


Рис. 2. Схема розбиття на підмножини в структурі дерева класифікації

Нехай n_1 – безумовна кількість помилок початкової НВ. Елементарна ознака φ_1^1 розділяє НВ на дві вибірки H_0 та H_1. Нехай h_0 та h_1, відповідно безумовна кількість помилок у вибірках H_0 та H_1. Ознака φ_1^2 розділить множину H_0 на дві множини H_{00} та H_{01}. Нехай h_{00} та h_{01} – безумовна кількість помилок у вибірках H_{00} та H_{01}. Аналогічно визначимо множини H_{10},H_{11} та кількості h_{10} та h_{11} для елементарної ознаки φ_2^2.

З початкової умови $(y > 1)$ випливає наступна ситуація:

$$\begin{cases} h_0 + h_1 \leq \frac{1}{y} * n_1 \\ h_{00} + h_{01} \leq \frac{1}{y} * h_0. \\ h_{10} + h_{11} \leq \frac{1}{y} * h_1 \end{cases} \quad (6)$$

З (6) отримаємо:

$$h_{00} + h_{01} + h_{10} + h_{11} \leq \frac{1}{y^2} * n_1. \quad (7)$$

Зробимо такі припущення в цьому відношенні: $h_0 \geq 1$, $h_1 \geq 1$, $h_{00} \geq 1$, $h_{01} \geq 1$, $h_{10} \geq 1$ та $h_{11} \geq 1$. Звідси будемо мати таке:

$$2^1 \leq \frac{1}{y} * n_1, 2^2 \leq \frac{1}{y^2} * n_1. \quad (8)$$

Аналогічно для набору ознак $\varphi_1^i, \varphi_2^i, \dots$, які розташовані на i-товому ярусі логічного дерева, будемо мати:

$$2^i \le \frac{1}{y^i} * n_1 \text{ або } (2y)^i \le n_1. \quad (9)$$

Звідси можна зробити висновок, що процес побудови дерева класифікації буде продовжуватися доти, доки в структурі дерева не буде m ярусів (рівнів), де m має такий вигляд:

$$m = R(\frac{\log_2 n_1}{1+\log_2 y}). \quad (10)$$

Під $R(x)$ розуміється заокруглення числа x до найближчого цілого числа, яке перевищує x. Наприклад, $Q(1{,}2) = 2, Q(3{,}7) = 4, Q(4{,}1) = 5$.

Отже, дерево класифікації, яке має m повних ярусів (тобто випадок, коли на $i-$товому ярусі стоять 2^{i-1} вершин), має $2^{m+1} - 1$ вершин – таким чином розпізнавання початкової НВ за умови $(y > 1)$ за допомогою повного ЛДК відбувається не більше, ніж за $2^{m+1} - 1$ кроків, де m розраховується за допомогою виразу (10).

На наступному етапі дослідження розглянемо питання складності схеми (процедури побудови) дерева класифікації для випадку АДК, ввівши на початку необхідні в подальшому визначення.

Визначення 2. Під потужністю деякої побудованої узагальненої ознаки (УО) або набору УО (для фіксованого кроку схеми АДК) будемо рахувати кількість навчальних пар $\left(x_i, f_R(x_i)\right)$ початкової НВ вигляду (1), які апроксимує (правильно класифікує) дана узагальнена ознака (послідовність узагальнених ознак).

Важливим моментом для схем АДК є те, що при покроковому розбитті НВ на дві вибірки H_0 та H_1 (і так далі) частина вибірки буде повністю покриватися поточним алгоритмом класифікації (узагальненою ознакою або їх набором) – тобто будемо мати справу з випадком сильного розділення класів масиву НВ. Отже, можна зробити припущення, що складність кінцевої схеми АДК (загальна кількість кроків побудови дерева) буде значною мірою залежати від процедури початкової оцінки та відбору набору незалежних алгоритмів класифікації a_i, їх початкових параметрів, параметрів наборів УО f_i, які вони генерують для кожного кроку схеми АДК.

Тоді для схеми АДК важливо розглянути загальну складність процедури побудови дерева класифікації при умові слабкої роздільності класів початкової НВ – при якій генерується не більше однієї УО потужністю в одиницю для кожної вершини дерева та при умові сильної роздільності, коли обмежень на кількість УО та їх потужність не накладається умовами задачі та практичною доцільністю і можливо їх будувати.

Випадок АДК. На першому етапі розглянемо випадок слабкого розділення класів з обмеженнями на набори УО що будуються схемою АДК.

Зазначимо, що процедура побудови алгоритмічного дерева має певні особливості з погляду поетапної апроксимації початкової НВ послідовністю УО. Нехай на кожному кроці побудови деякої моделі АДК, буде вибиратися для роботи один фіксований алгоритм класифікації з набору відібраних алгоритмів $(a_1, a_2, \dots, a_n)$, причому дерево класифікації може бути побудоване одним алгоритмом a_i та послідовністю УО, які він генерує.

Таким чином, після проведення n кроків процедури побудови дерева класифікації структура АДК буде являти собою деяку схему s_n (узагальнену ознаку другого порядку, яка побудована з набору синтезованих алгоритмами класифікації УО), яка є найбільш ефективною апроксимацією початкової НВ загального вигляду (1) набором незалежних алгоритмів класифікації та їх УО. Зрозуміло, що тут також s_n буде представляти деяку деревоподібну схему (структуру ДУО), яка складається з n вершин, тобто в конструкцію

схеми s_n будуть входити всього n алгоритмів класифікації (УО – при умові генерації для кожного кроку процедури побудови дерева не більше однієї узагальненої ознаки мінімальної потужності в одиницю) з початкового набору.

Отже, можна зробити висновок, що послідовність побудованих схем $s_1, s_2, \dots, s_j$ (узагальнених ознак другого порядку) збігається до початкової НВ вигляду (1), не більше ніж за M кроків (де M – загальна потужність початкової НВ), навіть за умов генерації на кожному кроці лише однієї УО, потужність кожної з яких не більше одиниці.

Деякий алгоритм класифікації, який буде вибиратися (фіксуватися) на $n-$ товому кроці в процедурі побудови моделі АДК (для генерації відповідної УО), позначимо через a_n, причому зрозуміло, що цьому алгоритму a_n відповідає деяка схема s_n, яка складається з алгоритмів $a_1, a_2, \dots, a_{n-1}$ та закінчується даним атрибутом (вершиною дерева класифікації – моделі АДК). Наприклад, на рис. 3 зображена деяка модель АДК в якій фіксованій схемі s_2 (вершині дерева класифікації, що будується) відповідає послідовність кроків (схем) $\{s_1\}$, а схемі s_M – послідовний шлях $\{s_1, s_2, \dots, s_{M-1}\}$.

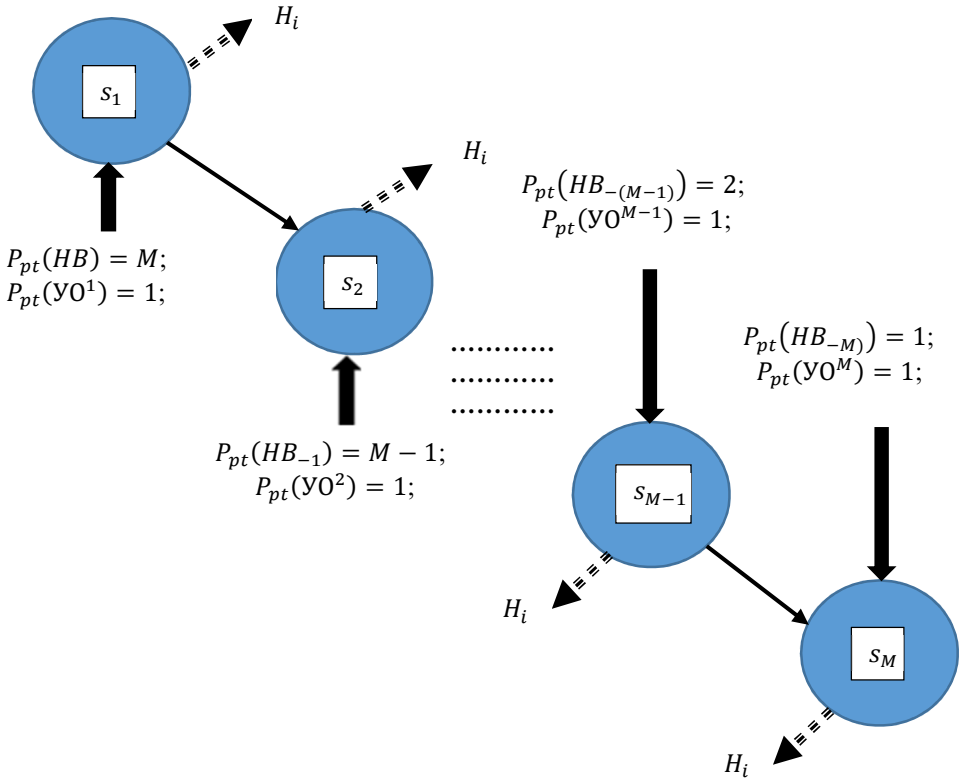


Рис. 3. Приклад структури АДК з УО в ролі вершин

Отже для моделі АДК можна зробити такий висновок: схема s_n (в структурі дерева класифікації) розділяє НВ на n непустих частин (підмножин), що не перетинаються. При цьому, оскільки в початковій НВ усього знаходиться M начальних пар, то схема s_M повністю розділить (апроксимує) початкову НВ (тобто s_M буде повністю розпізнавати вибірку, за умови генерації на кожному кроці по одній УО потужністю один). Таким чином, якщо на кожному $n-$ вому кроці схеми побудови АДК згенерована УО (відібраним алгоритмом класифікації a_n) слабо розділяє множину початкової НВ, то в цьому випадку процес побудови дерева класифікації збігається відносно початкової НВ та закінчується не більше ніж за M кроків, де $M-$ кількість усіх навчальних пар початкової НВ.

На наступному етапі дослідження важливо розглянути випадок сильного розділення класів початкової НВ, коли жодних обмежень на алгоритми a_i щодо генерації УО не накладаються (потужність побудованої УО обмежена лише практичною можливістю самого алгоритму класифікації a_i та структурними параметрами НВ).

Нехай через величину $P(f_j)$ позначимо загальну потужність (апроксимаційну здатність) відповідної УО f_j, $(1 \le j \le s)$, де $s -$ кількість УО в схемі АДК, що будується. Далі на деякому кроці $r, (1 \le r \le M)$ схеми АДК побудована послідовність узагальнених ознак $f_1, \dots, f_r$ з відповідними їм величинами $P(f_i) = z_i$, де $(1 \le z \le M), (1 \le i \le r)$, $M -$ загальна потужність НВ, причому серед них є величини $z^{\max}$ та z^{min} які є для них відповідно максимальними та мінімальними (відносно поточного кроку схеми АДК). Тоді в такому випадку, схема (модель) АДК буде побудована за t кроків, де величина t визначається співвідношенням (11).

$$t \le 2 * \frac{P_{pt}(\text{НВ})}{z^{\max}+z^{\min}} = \frac{2M}{z^{\max}+z^{\min}}. \quad (11)$$

Зауважимо, що у випадку ситуації, коли умовою прикладної задачі на схему АДК, що будується, накладаються обмеження щодо потужності синтезованих УО (не перевищення відповідної величини P) – схема дерева класифікації (модель АДК) буде побудована за t кроків, де величина t визначається співвідношенням (12).

$$t \le \frac{M}{P}. \quad (12)$$

Нагадаємо, що при жорстких обмеженнях схеми АДК на одну генеровану УО (де за умовою $P(f_j) = 1, (1 \le i \le t)$), тобто у випадку слабкого розділення класів поточної задачі схема дерева класифікації (модель АДК) буде побудована за t кроків, де величина $t \le M$.

Висновки відповідно до статті. Отже, зважаючи на все вищезазначене в цьому дослідженні, можна зробити такі висновки:

Для умови слабкого розділення класів у випадку ЛДК, якщо на кожному $n -$ вому кроці відібрана елементарна ознака φ_n слабо розділяє множину (підмножину) об'єктів початкової НВ, то в цьому випадку процес побудови дерева класифікації збігається відносно початкової НВ та закінчується не більше ніж за $m - 1$ кроків, де $m -$ кількість усіх навчальних пар початкової НВ.

Отже, дерево класифікації (структури ЛДК) за умови сильного розділення класів множини об'єктів початкової НВ, яке має m повних ярусів, рівнів (тобто випадок, коли на $i -$ товому ярусі стоять 2^{i-1} вершин), має $2^{m+1} - 1$ вершин. Таким чином розпізнавання масиву початкової НВ при умові $(y > 1)$ за допомогою повного ЛДК відбувається не більш ніж за $2^{m+1} - 1$ кроків, де m розраховується за допомогою виразу $m = R(\frac{\log_2 n_1}{1+\log_2 y})$.

Загальна кількість всіх кінцевих вершин логічної структури (листів дерева розпізнавання) побудованої схеми класифікації буде однозначно визначати кінцеву потужність схеми методу дерева класифікації (моделей ЛДК/АДК).

Потужністю деякої УО (набору побудованих УО), для фіксованого кроку схеми методу АДК – рахується загальна кількість навчальних пар $\left(x_i, f_R(x_i)\right)$ початкової НВ (підмножини початкової НВ) вигляду (1), які апроксимує (правильно класифікує) дана узагальнена ознака (послідовність узагальнених ознак).

У випадку слабкого розділення класів початкової НВ для схеми АДК процес побудови дерева класифікації збігається відносно масиву даних НВ та закінчується не більше ніж за M кроків, де $M -$ кількість всіх навчальних пар початкової НВ.

У випадку сильного розділення класів початкової НВ для схеми АДК, коли потужність побудованої УО (або набору УО) обмежена лише практичною можливістю самого алгоритму класифікації a_i та початковими параметрами НВ – схема (модель) АДК буде побудована за t кроків, де величина t визначається співвідношенням (11).

Список використаних джерел

1. Vtogoff P. E. Incremental Induction of Decision Trees. *Machine Learning.* 2009. № 4. P. 161–186.
2. Whitley D. An overview of evolutionary algorithms: practical issues and common pitfalls. *Information and Software Technology.* 2001. Vol. 43. № 14. P. 817–831.
3. Srikant R., Agrawal R. Mining generalized association rules. *Future Generation Computer Systems.* 1997. Vol. 13, № 2. P. 161–180.
4. Kotsiantis S. B. Supervised Machine Learning: A Review of Classification Techniques. Informatica. 2007. № 31, P. 249–268.
5. Deng H., Runger G., Tuv E. Bias of importance measures for multi-valued attributes and solutions. *Proceedings of the 21st International Conference on Artificial Neural Networks (ICANN).* 2011, P. 293–300.
6. Alpaydin E. Introduction to Machine Learning. London: The MIT Press, 2010. 400 p.
7. Суботин С. А. Построение деревьев решений для случая малоинформативных признаков. *Radio Electronics, Computer Science, Control*. 2019. № 1. P. 121–130.
8. Лавер В. О., Повхан І. Ф. Алгоритми побудови логічних дерев класифікації в задачах розпізнавання образів. *Вчені записки Таврійського національного університету. Серія: технічні науки.* 2019. Т. 30(69), № 4. С. 100–106.
9. Breiman L. L., Friedman J. H., Olshen R. A. Classification and regression trees. Boca Raton : Chapman and Hall/CRC, 1984. 368 p.
10. Dietterich T. G., Kong E. B. Machine learning bias, statistical bias and statistical variance of decision tree algorithms. Corvallis : Oregon State University, 1995. 14 p.
11. Subbotin S.A. Methods and characteristics of locality-preserving transformations in the problems of computational intelligence. *Radio Electronics, Computer Science, Control.* 2014. № 1. Pp. 120–128.
12. Povhan I. General scheme for constructing the most complex logical tree of classification in pattern recognition discrete objects. *Збірник наукових праць «Електроніка та інформаційні технології».* 2019. Вип. 11. С. 112–117.
13. Василенко Ю. А., Василенко Е. Ю., Повхан І. Ф., Ващук Ф. Г. Концептуальна основа систем розпізнавання образів на основі метода розгалуженого вибору ознак *European Journal of Enterprise Technologies.* 2004. № 7[1]. С. 13–15.
14. Василенко Ю. А., Повхан І. Ф., Ващук Ф. Г. Проблема оцінки складності логічних дерев розпізнавання та загальний метод їх оптимізації. *European Journal of Enterprise Technologies.* 2011. № 6/4(54). С. 24-28.
15. Hastie T. Tibshirani R., Friedman J. The Elements of Statistical Learning. Stanford, 2008. 768 p.
16. Mitchell T. Machine learning. New York : McGrawHill, 1997. 432 p.
17. Василенко Ю. А., Повхан І. Ф., Ващук Ф. Г. Загальна оцінка мінімізації деревоподібних логічних структур. *European Journal of Enterprise Technologies.* 2012. № 1/4(55). С. 29–33.
18. Василенко Ю. А., Василенко Е. Ю., Повхан І. Ф., Ковач М. Й., Нікарович О. Д. Мінімізація логічних деревоподібних структур в задачах розпізнавання образів. *European Journal of Enterprise Technologies.* 2004. № 3[9]. С. 12–16.
19. Повхан І. Ф. Проблема функціональної оцінки навчальної вибірки в задачах розпізнавання дискретних об‘єктів. *Вчені записки Таврійського національного університету.* Серія: технічні науки. 2018. Т. 29(68), № 6. С. 217–222.
20. Povhan I. Designing of recognition system of discrete objects. *2016 IEEE First International Conference on Data Stream Mining & Processing (DSMP)* (Lviv, 2016, Ukraine). Lviv, 2016. Pp. 226–231.
21. Повхан І. Ф. Особливості синтезу узагальнених ознак при побудові систем розпізнавання за методом логічного дерева. *Інформаційні технології та комп’ютерне моделювання ІТКМ-2019 : матеріали міжнародної науково-практичної конференції. Івано-Франківськ*, 2019, С. 169–174.
22. Amit Y., Geman D., Wilder K. Joint induction of shape features and tree classifiers. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence.* 1997. Vol. 19, № 11. P. 1300–1305.
23. Mingers J. An empirical comparison of pruning methods for decision tree induction. *Machine learning.* 1989. Vol. 4. № 2. P. 227–243.

References

1. Vtogoff, P. E. (2009). Incremental Induction of Decision Trees. *Machine Learning,* 4, pp. 161−186.
2. Whitley D. (2001). An overview of evolutionary algorithms: practical issues and common pitfalls. *Information and Software Technology*, *43*(14), pp. 817–831.

3. Srikant, R., Agrawal, R. (1997). Mining generalized association rules. *Future Generation Computer Systems*, *13*(2), pp. 161–180.

4. Kotsiantis, S. B. (2007). Supervised Machine Learning: A Review of Classification Techniques. *Informatica*, 31, pp. 249–268.

5. Deng, H., Runger, G., Tuv, E. (2011). Bias of importance measures for multi-valued attributes and solutions, *Proceedings of the 21st International Conference on Artificial Neural Networks (ICANN),* pp. 293–300.

6. Alpaydin, E. (2010). Introduction to Machine Learning. The MIT Press.

7. Subbotin, S. A. (2019). Construction of decision trees for the case of low-information features [Postroenye derevev reshenyi dlia sluchaia maloynformatyvnыkh pryznakov]. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 1, pp. 121–130.

8. Laver, V. O., Povkhan, I. F. (2019). Algorithms for constructing logical classification trees in pattern recognition problems [Alhorytmy pobudovy lohichnykh derev klasyfikatsii v zadachakh rozpiznavannia obraziv]. *Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnoho universytetu. Seriia: tekhnichni nauky – Scientific notes of Tauride national University. Series: technical Sciences, 30(69)*(4), p. 100–106.

9. Breiman, L. L., Friedman, J. H., Olshen, R. A. (1984). *Classification and regression trees*. Chapman and Hall/CRC.

10. Dietterich, T. G., Kong, E. B. (1995). *Machine learning bias, statistical bias and statistical variance of decision tree algorithms*. Oregon State University.

11. Subbotin, S. A. (2014). Methods and characteristics of locality-preserving transformations in the problems of computational intelligence. *Radio Electronics, Computer Science, Control,* 1, pp. 120–128.

12. Povkhan, I. (2019). General scheme for constructing the most complex logical tree of classification in pattern recognition of discrete objects. *Collection of scientific papers "Electronics and information technology",* 11, pp. 112–117.

13. Vasylenko Yu. A., Vasylenko E. Yu., Povkhan I. F., Vashchuk F. H. (2004). Kontseptualna osnova system rozpiznavannia obraziv na osnovi metoda rozghaluzhenoho vyboru oznak [Conceptual basis of pattern recognition systems based on the method of branched feature selection]. *European Journal of Enterprise Technologies*, 7[1], pp. 13–15.

14. Vasylenko, Yu. A., Povkhan, I. F., Vashchuk, F. H. (2011). Problema otsinky skladnosti lohichnykh derev rozpiznavannia ta zahalnyi metod yikh optymizatsii [The problem of estimating the complexity of the logic trees, recognition, and a general method of optimization]. *European Journal of Enterprise Technologies*, 6/4(54), pp. 24-28.

15. Hastie T. Tibshirani R., Friedman J. (2008). The Elements of Statistical Learning. Stanford.

16. Mitchell, T. (1997). *Machine learning*. McGrawHill.

17. Vasylenko, Yu. A., Povkhan, I. F., Vashchuk, F. H. (2012). Zahalna otsinka minimizatsii derevopodibnykh lohichnykh struktur [General estimation of tree logical structures minimization]. *European Journal of Enterprise Technologies,* 1/4 (55), pp. 29–33.

18. Vasylenko, Yu. A., Vasylenko, E. Yu., Povkhan, I. F., Kovach, M. Y., Nikarovych, O. D. (2004). Minimizatsiia lohichnykh derevopodibnykh struktur v zadachakh rozpiznavannia obraziv [Minimization of logic tree structures in pattern recognition problems]. *European Journal of Enterprise Technologies,* 3[9], pp. 12–16.

19. Povkhan, I. F. (2018). Problema funktsionalnoi otsinky navchalnoi vybirky v zadachakh rozpiznavannia dyskretnykh obiektiv [The problem of functional evaluation of the training sample in the problems of recognition of discrete objects]. *Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnoho universytetu. Seriia: tekhnichni nauky – Scientific notes of Taurida national University. Series: technical Sciences*, *29(68)*(6), pp. 217–222.

20. Povhan, I. (2016). Designing of recognition system of discrete objects. In *IEEE First International Conference on Data Stream Mining & Processing (DSMP)* (pp. 226–231). Lviv.

21. Povkhan, I. F. (2019). Osoblyvosti syntezu uzahalnenykh oznak pry pobudovi system rozpiznavannia za metodom lohichnoho dereva [Features of synthesis of generalized features in the construction of recognition systems using the logical tree method]. In *Informatsiini tekhnolohii ta kompiuterne modeliuvannia ITKM-2019 : materialy mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii – Materials of the international scientific and practical conference "Information technologies and computer modeling ITKM-2019*" (pp. 169–174). Ivano-Frankivsk.

22. Amit, Y., Geman, D., Wilder, K. (1997). Joint induction of shape features and tree classifiers. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 19*(11), pp. 1300–1305.

23. Mingers, J. (1989). An empirical comparison of pruning methods for decision tree induction. *Machine learning,* 4(2), pp. 227–243.

UDC 004.8: 004.89: 519.7

Igor Povkhan

QUESTIONS OF COMPLEXITY OF THE PROCEDURE FOR CONSTRUCTING AN ALGORITHMIC CLASSIFICATION TREE SCHEME

Urgency of the research. *At the present stage of development of information systems and technologies that are based on mathematical models of the theory of artificial intelligence (methods and schemes of the classification tree algorithm), there is a fundamental problem of narrow specialization of existing approaches and methods in socio-economic, environmental and other systems of primary analysis and processing of large amounts of information. The problems associated with the theme of pattern recognition are very diverse and arise in the modern world in all areas of Economics and social content of human activity, which leads to the need to build and study mathematical models of the corresponding systems. As of now, there is no universal approach to their solution, several fairly General theories and approaches have been proposed that allow solving many types (classes) of problems, but their applications are quite sensitive to the specifics of the problem itself or the subject area of application. The presented work is devoted to the problems of models of logical and algorithmic classification trees (LCT/ACT schemes), offers an assessment of the complexity of algorithmic structures of trees (classification tree models), which consist of independent and Autonomous classification algorithms and will represent to a certain extent a new recognition algorithm (it is clear that synthesized from known schemes, algorithms and methods).*

Target setting. *Today, various approaches to building recognition systems in the form of classification trees (LCT/ACT) are relevant, and the interest in recognition methods that use classification trees is caused by a number of useful properties that they possess. On the one hand, the complexity of the class of recognition functions in the form of classification tree models, under certain conditions, does not exceed the complexity of the class of linear recognition functions (the simplest known). On the other hand, recognition functions in the form of classification trees allow you to distinguish between causal factors in the classification process – it is known that the process of classification of new objects that have not yet been encountered in the world of many animals and people (with the exception of objects, information about which is transmitted by genetic means (investigative), as well as in some other cases), occurs according to the so-called logical decision tree (in connection with the neural network concept). It is clear that it is advisable not to develop a new algorithm, but to offer a concept of rational use of the already accumulated potential of algorithms and classification methods in the form of algorithmic models of classification trees (ACT structures), and that is why this work intends to at least partially overcome these limitations and is devoted to assessing the complexity of the procedure for constructing algorithmic models (logical) classification trees in the field of recognition problems.*

Actual scientific researches and issues analysis. *The study reviewed recent open access publications on the General problem of approaches, methods, algorithms and recognition schemes (LCT/ACT models) for discrete objects (discrete images in image recognition problems.*

The research objective. *The possibility of an efficient and cost-effective scheme for constructing an algorithmic classification tree and evaluating the complexity of such a procedure (ACT structure model) based on the source arrays of large-volume training samples.*

The statement of basic materials. *We propose an estimation of the complexity of the procedure for constructing an algorithmic classification tree for an arbitrary case (for conditions of weak and strong division of classes in the training sample). The solution to this question is of a fundamental nature, in terms of assessing the structural complexity of classification models (in the form of tree structures, ACT structures of discrete objects for a wide class of applied classification and recognition problems in terms of developing promising schemes and methods for their final optimization (minimization) of the design. This research is relevant not only for constructions of algorithmic classification trees, but also allows us to extend the scheme of complexity estimation to the General case of logical classification tree structures.*

Conclusions. *We investigated the structural complexity LCT/ACT, the proposed upper bound for the complexity for building algorithmic classification tree in terms of weak and strong separation of classes of the initial training sample.*

Keywords: *recognition problems, classification trees, algorithmic tree, recognition scheme, discrete object, generalized feature. References: 23.*

Повхан Ігор Федорович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри програмного забезпечення систем, ДВНЗ «Ужгородський національний університет» (вул. Заньковецької 89Б, м. Ужгород, 88000, Україна).
Povkhan Igor – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of software, Uzhgorod national University (89Б Zankovetskoy Str., 88000 Uzhgorod, Ukraine).
E-mail: igor.povkhan@uzhnu.edu.ua
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-1681-3466

Повхан І. Питання складності процедури побудови схеми алгоритмічного дерева класифікації. *Технічні науки та технології.* 2020. № 3 (21). С. 142-153.

УДК 004.42:535.361
DOI: 10.25140/2411-5363-2020-3(21)-154-162

Сергій Точилін

ПРИКЛАДНЕ ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ОПТОВОЛОКОННОГО ЦИФРОВОГО СПЕКТРОМЕТРА ВТС-110S

Актуальність теми дослідження. *Спектральні прилади широко використовуються в наукових та прикладних оптичних дослідженнях. Сучасні спектральні прилади в багатьох випадках є цифровими. Розробка прикладного програмного забезпечення (ПЗ) для цифрових спектральних приладів є актуальним завданням.*

Постановка проблеми. *Здебільшого компанії, які виготовляють спектральне устаткування, поставляють цифрові спектральні прилади і прикладне ПЗ в комплекті. У багатьох випадках використання цього ПЗ прив'язано до певної платформи. Подібні особливості має прикладне програмне забезпечення для спектрометра ВТС-110S. Крім того, ПЗ, яке поставляється разом із приладами, може не включати необхідних для оптичних досліджень процедур обробки спектральних даних.*

Аналіз останніх досліджень і публікацій. *У наш час однією з найбільш популярних мов програмування є Java. Останнім часом мовою програмування Java розроблена кросплатформна програма ST_Complex – прикладне ПЗ для спектрометра ВТС-110S.*

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. *Програма ST_Complex має певні обмеження. Вона дозволяє спектрометру ВТС-110S реєструвати спектри випромінювання тільки в однократному режимі. Крім того, при обробці спектральних даних відсутня можливість знаходження результатів множення та ділення спектрів один на одного, а також визначення кореляційного спектра та його коефіцієнта відповідності.*

Постановка завдання. *Розробити Java-додаток, який може використовуватися для реєстрації спектрометром ВТС-110S спектрів випромінювання в однократному та безперервному режимі, а також для кількісного порівняння і обробки за допомогою арифметичних операцій спектральних даних об'єктів дослідження. При цьому для порівняння спектрів джерел оптичного випромінювання використовувати різницеві та кореляційні спектри, а також їхні коефіцієнти відповідності.*

Виклад основного матеріалу. *Описані особливості функціонування та графічний інтерфейс користувача Java-додатка, що вирішує поставлене завдання. Наведені приклади його використання.*

Висновки відповідно до статті. *Розроблено кросплатформне прикладне ПЗ для реєстрації спектрометром ВТС-110S спектрів випромінювання в однократному та безперервному режимі, а також для кількісного порівняння і обробки за допомогою арифметичних операцій спектральних даних об'єктів дослідження. З порівняння спектрів об'єктів дослідження програмою визначаються коефіцієнти відповідності для їх різницевого та кореляційного спектра.*

Ключові слова: *спектрометр; спектр; прикладне програмне забезпечення.*
Рис.: 5. Бібл.: 8

Актуальність теми дослідження. Оптичний спектральний аналіз широко використовується в наукових і прикладних дослідженнях. Аналіз проводять на основі спектрів, які зареєстровані спектральними приладами, що працюють у діапазоні довжин хвиль оптичного випромінювання.

Сучасні спектральні прилади в багатьох випадках є цифровими. Керування їхньою роботою, а також прийом та обробка даних спектральних вимірів, здійснюється прикладним програмним забезпеченням (ПЗ).

При цьому розробка прикладного ПЗ для спектральних приладів є актуальним завданням.

Постановка проблеми. Компанії, які виготовляють спектральне устаткування, переважно поставляють цифрові спектральні прилади й комп’ютерні програми для їх використання (прикладне ПЗ) у комплекті. У багатьох випадках використання цих програм жорстко прив’язано до певної платформи. Подібні особливості має прикладне програмне забезпечення для цифрового оптоволоконного спектрометра ВТС-110S [1], функціональні можливості якого описані в [2].

Крім того, програмне забезпечення, яке поставляється разом із приладами, може не включати необхідних для оптичних досліджень процедур обробки спектральних даних.

При цьому розробка кросплатформного прикладного програмного забезпечення для цифрових спектральних приладів, зокрема і для ВТС-110S, яке управляє їхньою роботою, реєструє та обробляє спектри джерел оптичного випромінювання за допомогою необхідних процедур, є актуальною проблемою.

© Точилін С. Д., 2020

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботах [3; 4] повідомляється про розробку прикладного ПЗ для спектрометра ВТС-110S.

При цьому в [3] також наведені характеристики та команди керування для цього цифрового оптоволоконного спектрального приладу.

У той час в [4] описаний кросплатформний програмний комплекс для ВТС-110S, що був створений за допомогою мови програмування С++. Він, зокрема, забезпечує реєстрацію приладом спектрів джерел оптичного випромінювання як в однократному, так і в безперервному режимі, а також дозволяє виконувати над ними математичні операції, у тому числі й арифметичні (додавання, вирахування, множення, ділення).

Останнім часом при оптичних дослідженнях для кількісного порівняння спектрів вторинного випромінювання (СВВ) різних речовин використовують їх різницевий спектр (РС) $J_X^E(\lambda)$, відповідно до [5, 6] його визначають за допомогою виразу:

$$I_X^E(\lambda) = 1 - \left|I_X(\lambda) - I_E(\lambda)\right| = 1 - \left|\frac{I'_X(\lambda)}{I'_{X\,max}} - \frac{I'_E(\lambda)}{I'_{E\,max}}\right|, \quad (1)$$

де λ – довжина хвилі, $I_X(\lambda)$ і $I_E(\lambda)$ – нормовані СВВ для речовини (X), яку аналізують, та еталонної речовини (E) відповідно, $I'_X(\lambda)$, $I'_E(\lambda)$, $I'_{X\max}$, $I'_{E\max}$ – зареєстровані спектри для речовини, що досліджують, і еталонної речовини, а також їх максимальні значення відповідно.

Оцінка ідентичності або відмінності спектрів $I_X(\lambda)$ та $I_E(\lambda)$ здійснюється за допомогою коефіцієнта відповідності K_d [5; 6]:

$$K_d = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(1 - \left|I_X(\lambda) - I_E(\lambda)\right|\right)_i = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} I_X^E(\lambda_i), \quad (2)$$

де N – число замкнутих інтервалів $\Delta\lambda$ у спектральному діапазоні довжин хвиль від λ_I до λ_{II} із шириною B, $B = \lambda_{II} - \lambda_I$, $N = B / \Delta\lambda$.

Відповідно до (2), при $\Delta\lambda \to 0$, коефіцієнт K_d має значення:

$$K_d = \frac{1}{B}\int_{\lambda_I}^{\lambda_{II}} I_X^E(\lambda)d\lambda. \quad (3)$$

Згідно з (3) K_d – середнє значення різницевого спектра в діапазоні довжин хвиль від λ_I до λ_{II}.

У той час певний інтерес при порівнянні $I'_X(\lambda)$ та $I'_E(\lambda)$ в діапазоні довжин хвиль від λ_I до λ_{II}, на якому $I'_E(\lambda)$ не містить нульових значень, має кореляційний спектр (КС) $J_X^E(\lambda)$, що визначається виразом:

$$J_X^E(\lambda) = 1 - \left|\frac{J_X(\lambda) - J_E(\lambda)}{J_E(\lambda)}\right| = 1 - \left|\frac{\left(I'_X(\lambda) / I'_{XE}\right) - \left(I'_E(\lambda) / I'_{EE}\right)}{\left(I'_E(\lambda) / I'_{EE}\right)}\right|, \quad (4)$$

де $J_X(\lambda)$, $J_E(\lambda)$ – нормовані за значеннями I'_{XE} та I'_{EE} спектри $I'_X(\lambda)$ й $I'_E(\lambda)$ відповідно, I'_{XE}, I'_{EE} – інтенсивність на певній, характерній для даного еталона довжині хвилі λ_E $(\lambda_I \le \lambda_E \le \lambda_{II})$ для спектрів $I'_X(\lambda)$ і $I'_E(\lambda)$ відповідно.

При цьому оцінка ідентичності або відмінності об'єктів дослідження з еталоном на основі (4) здійснюється за допомогою коефіцієнта відповідності K_c (середнього значення КС у спектральному діапазоні від λ_I до λ_{II}):

$$K_c = \frac{1}{B}\int_{\lambda_I}^{\lambda_{II}} J_X^E(\lambda)d\lambda. \quad (5)$$

Для реєстрації спектрів вторинного випромінювання поряд зі спектрометрами широко використовують світлофільтри. При цьому загальне пропущення *τ(λ)* спектральної установки дозволяє виділяти інтервал довжин хвиль необхідний для реєстрації спектрів об'єктів дослідження при придушенні збудливого випромінювання.

У той час характерною рисою $J_X^E(\lambda)$ та K_c, які визначаються виразами (4) та (5), відповідно, є їх незмінність для різних *τ(λ)*.

При цьому $I_X^E(\lambda)$ й K_d, які розраховують із використанням (1) та (3), відповідно, подібної особливості не мають.

Відзначимо також, що вирази (1), (3), (4), (5) можна використовувати і для порівняння оптичних спектрів джерел первинного випромінювання.

Крім того, при дослідженні особливостей $I'_X(\lambda)$ і $I'_E(\lambda)$ певний інтерес мають і дані про екстремальні значення $I_X^E(\lambda)$ та $J_X^E(\lambda)$.

У наш час однією з найбільш популярних мов програмування, відповідно до індексу TIOBE [7], є Java™. Вона кросплатформна і широко використовується в прикладних цілях. Java має розвинений API, який вільно поширюється.

У роботі [8] мовою програмування Java нами була розроблена програма ST_Complex – прикладне ПЗ для спектрометра ВТС-110S.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Програма ST_Complex мала певні обмежень, зокрема, під її керуванням спектрометр ВТС-110S міг реєструвати спектри джерел оптичного випромінювання тільки в однократному режимі.

Крім того, при обробці експериментальних даних була відсутня можливість знаходження результатів множення та ділення спектрів один на одного, а також визначення $J_X^E(\lambda)$ і K_c.

Постановка завдання. У цій роботі була поставлено завдання розробки за допомогою мови програмування Java кросплатформного прикладного ПЗ, яке може використовуватися для реєстрації спектрометром ВТС-110S спектрів джерел оптичного випромінювання в однократному та безперервному режимі, а також кількісного порівняння і обробки за допомогою арифметичних операцій спектральних даних об'єктів дослідження.

При цьому для кількісного порівняння спектрів джерел оптичного випромінювання передбачалося використовувати вирази (1), (3), (4) та (5).

Виклад основного матеріалу. Для вирішення поставленого завдання був створений Java-додаток DS_Complex, який при роботі зі спектрометром ВТС-110S використовував інтерфейс RS-232 та протокол ASCII. Програма мала графічний інтерфейс користувача (Graphical User Interface – GUI), що розташовувався на панелі із вкладками: «Registration», «Matching» та «Processing».

Набір компонентів GUI вкладки «Registration» використовувався для керування процесом реєстрації спектрів джерел оптичного випромінювання спектрометром ВТС-110S, а також відображення спектральних даних. На початку роботи з ним за допомогою списку, який розкривається, та кнопки «Port» вибирався COM-порт спектрометра, а при натисканні на кнопку «Time» задавався час експозиції спектра (у мілісекундах), чисельне значення якого попередньо встановлювалося в полі вводу.

Процес реєстрації здійснювалася після натискання на кнопку «Run». При цьому необхідні для роботи програми коефіцієнти, які визначають калібрування ВТС-110S по довжинах хвиль, знаходилися у файлі Coefficients.csv.

У випадку «включення» прапорця «Loop» реалізовувався багаторазовий режим реєстрації, при «виключенні» – однократний. При роботі спектрометра під час реєстрації в багаторазовому режимі кнопка «Run» мала назву «Stop» та використовувалася для зупинки цього процесу.

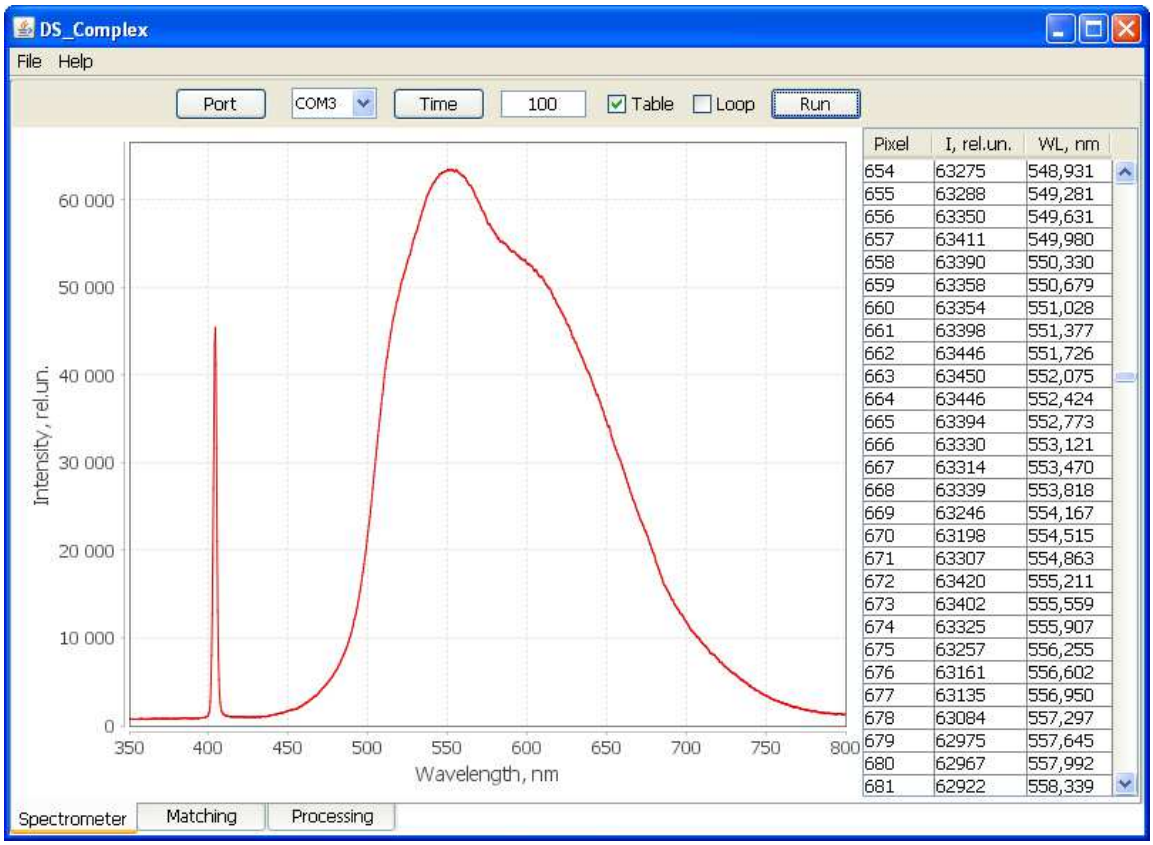
Зареєстрований спектр відображався на панелі додатка в графічному вигляді. При «включенні» прапорця «Table» дані спектральних вимірів могли додатково представлятися і у табличному вигляді.

Крім того, спектральні дані можна було зберегти у файлах формату *.csv і при необхідності одержати до них доступ за допомогою меню «File».

У той час інформація про створений Java-додаток та особливостях його роботи була доступна при використанні меню «Help».

На рис. 1, як приклад, зображено вікно програми DS_Complex зі спектром фотолюмінесценції (ФЛ) жовтого кольорового паперу, на рис. 2 – червоного.

ФЛ кольорового паперу збуджувалася фіолетовим лазером з довжиною хвилі випромінювання 405 нм. При реєстрації її спектрів використовувався абсорбційний світлофільтр ЖЗС5 завтовшки 2 мм.



Pixel	I, rel.un.	WL, nm
654	63275	548,931
655	63288	549,281
656	63350	549,631
657	63411	549,980
658	63390	550,330
659	63358	550,679
660	63354	551,028
661	63398	551,377
662	63446	551,726
663	63450	552,075
664	63446	552,424
665	63394	552,773
666	63330	553,121
667	63314	553,470
668	63339	553,818
669	63246	554,167
670	63198	554,515
671	63307	554,863
672	63420	555,211
673	63402	555,559
674	63325	555,907
675	63257	556,255
676	63161	556,602
677	63135	556,950
678	63084	557,297
679	62975	557,645
680	62967	557,992
681	62922	558,339

Рис. 1. Вікно програми DS_Complex зі спектром ФЛ жовтого паперу

Набір компонентів GUI програми DS_Complex, що розташовувався на вкладці «Matching», використовувався для формування та обробки РС і КС на основі спектрів, які були зареєстровані спектрометром ВТС-110S.

При роботі з ним за допомогою меню «File» спектри оптичного випромінювання (СОВ) еталонного об'єкта та об'єкта аналізу завантажувалися з *.csv файлів і відображалися на панелі додатка. Вибір формування та обробки РС або КС визначався за допомогою прапорців «I(WL)» і «J(WL)» відповідно.

У той час для ініціалізації значень λ_I і λ_{II} спектрального діапазону РС або КС використовувалися поля вводу «Low value» та «High value» відповідно.

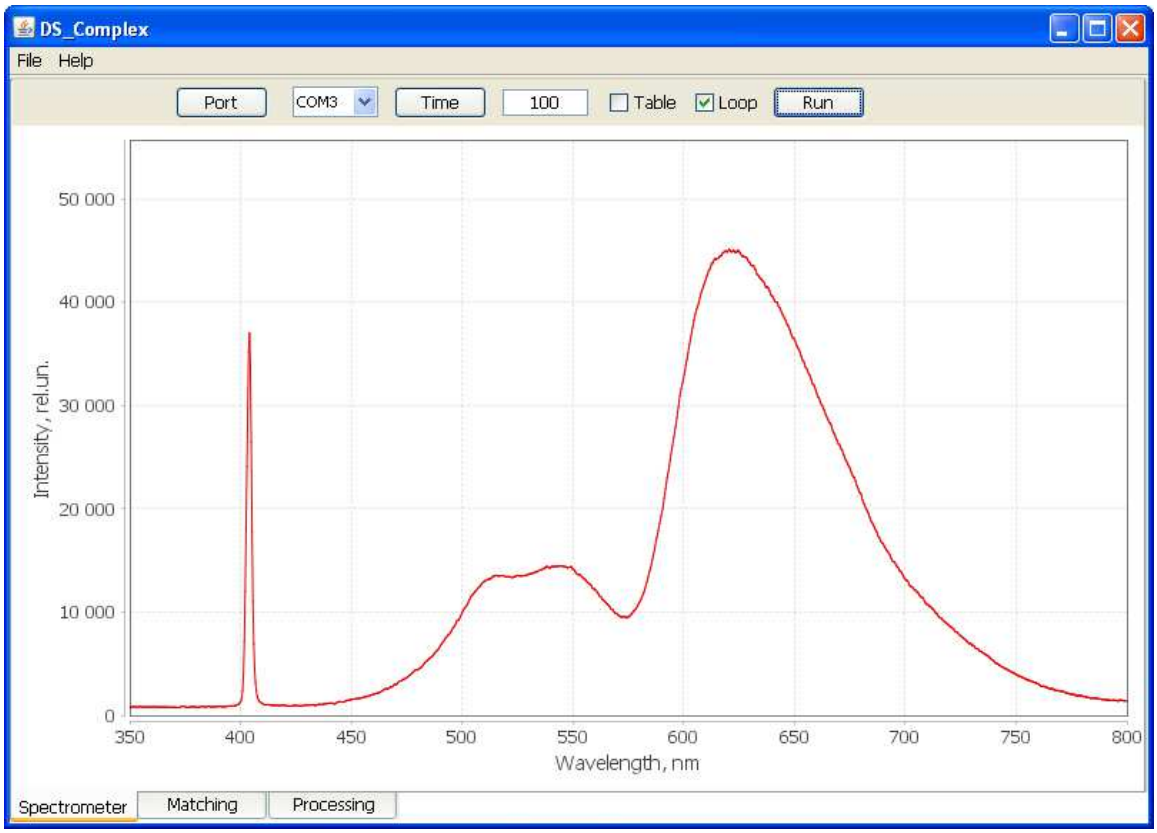


Рис. 2. Вікно програми DS_Complex зі спектром ФЛ червоного паперу

При включеному прапорці «I(WL)», після натискання на кнопку «Calculate», програма DS_Complex розраховувала різницевий спектр. Потім виконувала його чисельне інтегрування зі змінним кроком та розрахунок коефіцієнта K_d з використанням виразу (3). Крім того, визначала мінімальне I_{min} та максимальне значення I_{max} залежності $I_X^E(\lambda)$. При цьому РС відображався на панелі додатка в графічному вигляді, а значення K_d, I_{max} та I_{min} з'являлися в полях вводу «Kd», «Imax» і «Imin» відповідно.

Спектральні дані $I_X^E(\lambda)$ поміщалися в таблицю додатка. У ній фон рядків із параметрами екстремумів РС здобував сірий колір.

У той час при включеному прапорці «J(WL)», після натискання на кнопку «Calculate», програма DS_Complex провадила розрахунок КС та обробку його спектральних даних. При цьому значення коефіцієнта K_c визначалося за допомогою виразу (5).

КС відображався на панелі додатка в графічному вигляді, а значення K_c, $J_{\max}$ і $J_{\min}$ з'являлися в полях вводу «K_c», «$J_{\max}$» і «$J_{\min}$» відповідно, а дані $J_X^E(\lambda)$ поміщалися в таблицю додатка.

Крім того, розроблений додаток дозволяє зберегти РС і КС у файлах формату *.csv та за необхідності одержати до них доступ за допомогою меню «File».

На рис. 3 як приклад зображене вікно програми DS_Complex із РС і значеннями K_d, $I_{\max}$ та $I_{\min}$, на рис. 4 вікно із КС і K_c, $J_{\max}$, $J_{\min}$.

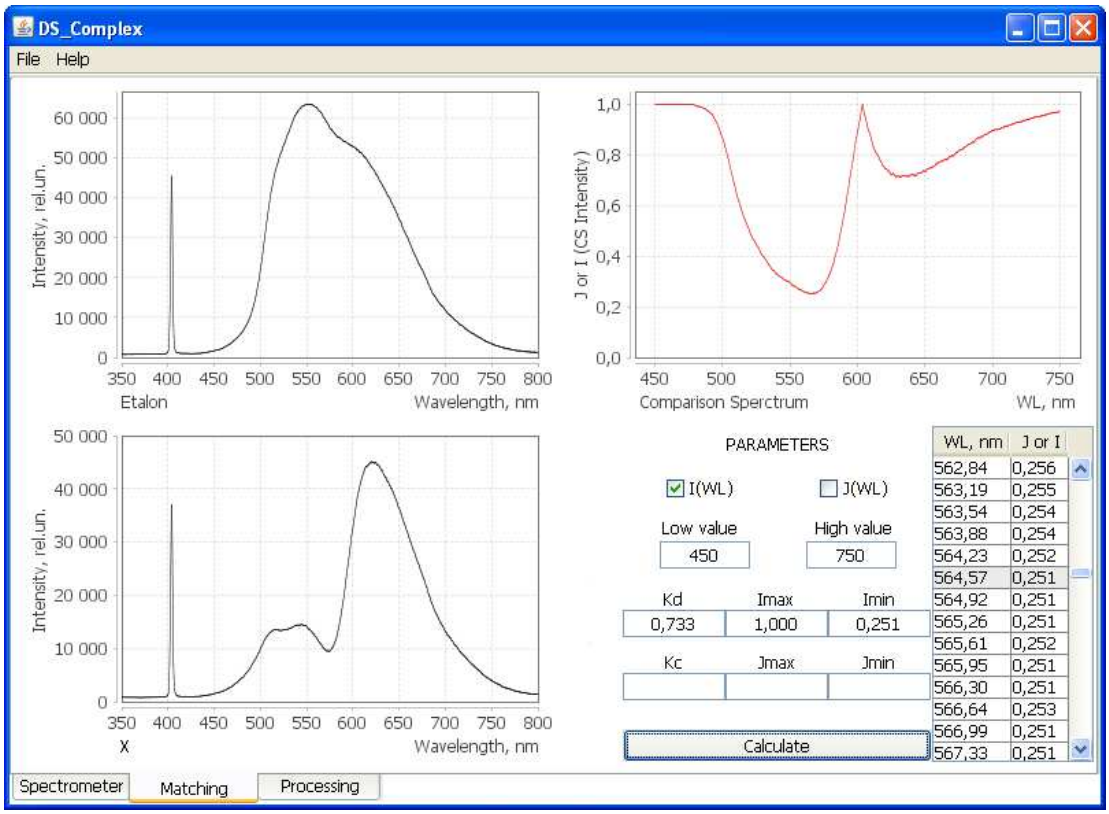


Рис. 3. Вікно програми зі спектрами ФЛ червоного та жовтого паперу та їх РС

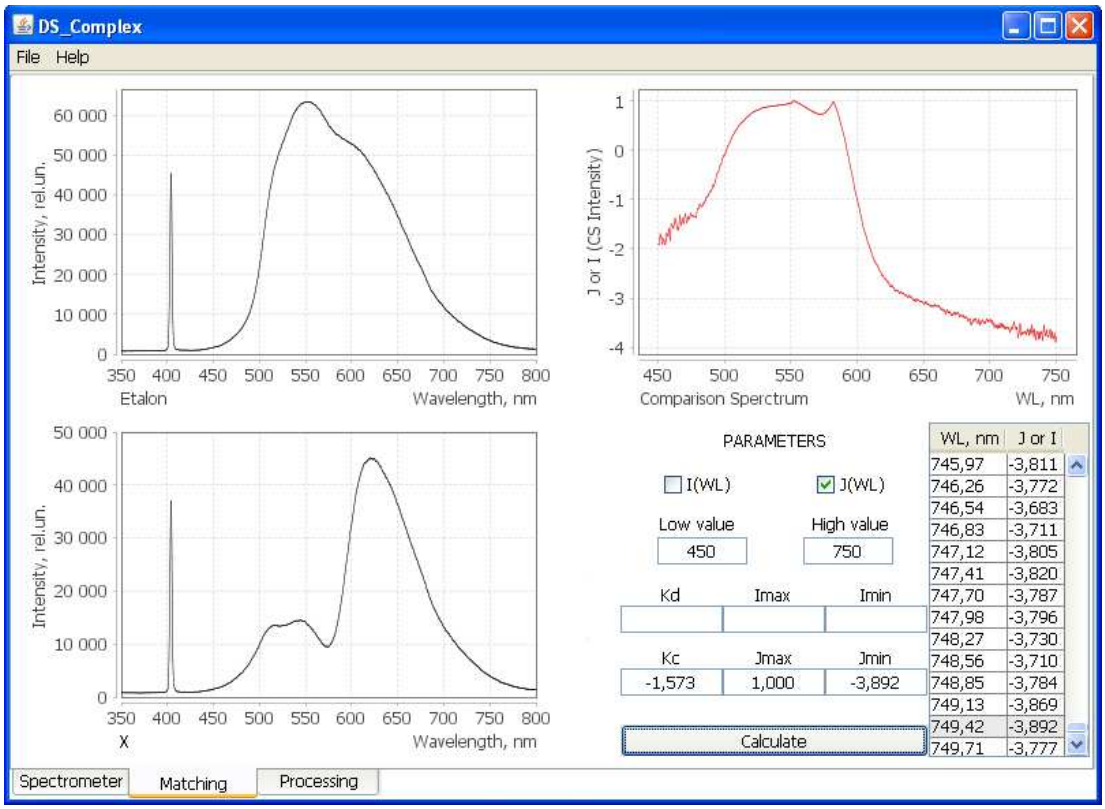


Рис. 4. Вікно програми зі спектрами ФЛ червоного та жовтого паперу та їх КС

РС та КС були отримані при порівнянні спектрів ФЛ кольорового паперу – червоного та жовтого (вибирався як еталон). При цьому значення λ_E покладалося рівним довжині хвилі прояву максимуму інтенсивності спектра еталона $I'_{E\,max}$.

Набір компонентів GUI програми DS_Complex, що розташовувався на вкладці «Processing», дозволяв виконувати математичні операції додавання, вирахування, множення та ділення над спектрами джерел оптичного випромінювання, які були зареєстровані спектрометром ВТС-110S. На початку роботи з ним при використанні меню «File» СОВ джерел Sa, Sb завантажувалися з *.csv файлів і відображалися на панелі додатка. У той час перед розрахунком результуючого спектра Sr за допомогою повзунків GUI встановлювалися необхідні значення к коефіцієнтів A і B, які прямо пропорційно змінювали зареєстровану спектральну інтенсивність Sa і Sb (для всіх спектральних точок, які були оцифровані приладом), відповідно. Тип математичної обробки для одержання Sr визначався при включенні прапорця GUI вкладки «Processing», назва якого збігалася з виразом необхідної математичної операції. При обчисленні Sr за допомогою кожної математичної операції використовувалися пари значень спектральної інтенсивності Sa та Sb для оцифрованих точок цих спектрів, які мали однакові довжини хвиль.

Після натискання на кнопку «Calculate» програма DS_Complex розраховувала спектр Sr, який відображався в графічному вигляді на панелі додатка, а його дані поміщалися в таблицю. Спектр Sr можна було зберегти у файлі формату *.csv і при необхідності одержати до нього доступ за допомогою меню «File».

На рис. 5 як приклад зображене вікно програми DS_Complex при множенні спектра фотолюмінесценції жовтого паперу (Sa) на спектр ФЛ червоної (Sb).

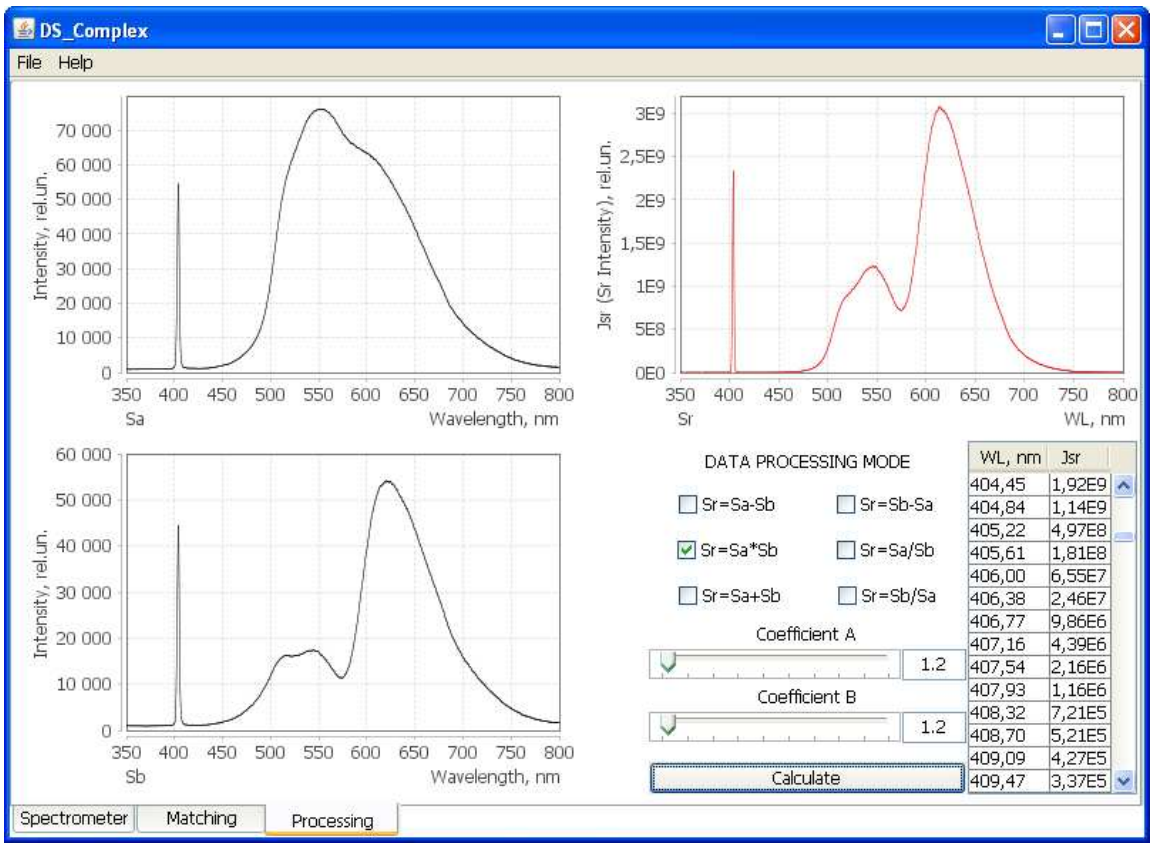


Рис. 5. Вікно програми DS_Complex при множенні спектрів ФЛ червоного та жовтого паперу

Висновки відповідно до статті. Таким чином, у цій роботі був розроблений кросплатформний Java-додаток DS_Complex (прикладне ПЗ) для реєстрації спектрометром ВТС-110S спектрів джерел оптичного випромінювання в однократному та безперервному режимі, а також кількісного порівняння і обробки за допомогою арифметичних операцій спектральних даних об'єктів дослідження.

При кількісному порівнянні спектрів об'єктів дослідження програмою визначаються коефіцієнти відповідності для їх різницевого та кореляційного спектра.

Надалі передбачається модернізувати Java-додаток DS_Complex, зокрема, забезпечити можливість його роботи в бінарному режимі обміну даними зі спектрометром ВТС-110S.

Список використаних джерел

1. Spectrometers. URL: http://www.science-surplus.com/products/spectrometers.

2. Hopkins Jeffrey L. Using Commercial Amateur Astronomical Spectrographs. Hopkins. London : Springer, 2013. 286 p.

3. Кобелев Д. И., Иордан В. И. Разработка программного комплекса для управления спектрометром ВТС-110S. *Ломоносовские чтения на Алтае: фундаментальные проблемы науки и образования* : сборник научных статей международной конференции (20-24 октября 2015 г., г. Барнаул). Барнаул : Изд-во АлтГУ, 2015. С. 1109–1114.

4. Иордан В. И., Кобелев В. И., Лапин А. А. Программный комплекс для регистрации и первичной обработки спектрограмм источников оптического излучения в процессе их регистрации спектрометром ВТС-110S. *Многоядерные процессоры, параллельное программирование, ПЛИС, системы обработки сигналов.* 2017. № 7. С. 220–227.

5. Умаров М. Ф., Горелик В. С. Оптическая спектроскопия биоактивных препаратов. Вологда : ВоГУ, 2014. 147 с.

6. Voinov Yu. P., Gorelik V. S., Umarov M. F., Morozova S. V. Difference fluorescence spectroscopy of the structure and composition of bioactive preparations. *Bulletin of the Lebedev Physics Institute.* 2011. Vol. 38, No. 11. P. 323–327.

7. TIOBE Index for August 2020. URL: https://www.tiobe.com/tiobe-index/.

8. Точилін С. Д. Кросплатформне прикладне програмне забезпечення для спектрометра ВТС-110S. *Міжнародний науковий журнал «Інтернаука»*. 2019. Т. 1, № 5 (67). С. 45–50.

References

1. *Spectrometers*. (n.d.). www.science-surplus.com. http://www.science-surplus.com/products/spectrometers.

2. Hopkins, Jeffrey L. (2013). *Using Commercial Amateur Astronomical Spectrographs*. Springer.

3. Jordan, V. I., Kobelev, D. I. (2015). Razrabotka programmnogo kompleksa dlya upravleniya spektrometrom BTC-110S [Development of a software package for controlling the BTC-110S spectrometer]. In *Lomonosov Readings in Altai: Fundamental Problems of Science and Education – Lomonosov's reading in altai: fundamental problems of science and education: Proceedings of an international conference : collection of scientific articles of the international conference* (Oktober 20-24, 2015, Barnaul) (pp. 1109-1114). Barnaul, ASU.

4. Jordan, V. I., Kobelev, D. I., Lapin, A. A. (2017). Programmnyy kompleks dlya registratsii i pervichnoy obrabotki cpektrogramm istochnikov opticheskogo izlucheniya s ispol'zovaniyem spektrometra BTC-110S [Software complex for registration and of primary processing spectrograms of optical radiation sources using the BTC-110S spectrometer]. *Mnogoiadernye protsessory, parallelnoe programmirovanie, PLIS, sistemy obrabotki signalov – Multi-core processors, parallel programming, FPGAs, signal processing systems*, 7, pp. 220–227.

5. Umarov, M. F., Gorelik. V. S. (2014). *Opticheskaia spektroskopiia bioaktivnykh preparatov [Optical spectroscopy of bioactive drugs]*.VSU.

6. Voinov, Yu. P., Gorelik, V. S., Umarov, M. F., Morozova, S. V. (2011) Difference fluorescence spectroscopy of the structure and composition of bioactive preparations. *Bulletin of the Lebedev Physics Institute, 38*(11), pp. 323–327.

7. *TIOBE Index for August 2020* (n.d.). www.tiobe.com. https://www.tiobe.com/tiobe-index.

8. Tochilin, S. D. (2019). Krosplatformne prykladne prohramne zabezpechennya dlya spektrometra BTC-110S [Cross-platform application software for the BTC-110S spectrometer]. *Mizhnarodnyy naukovyy zhurnal «Internauka» – International scientific journal «Internauka»,* 1(5(67)), pp. 45–50.

UDC 004.42:535.361

Sergei Tochilin

APPLIED SOFTWARE FOR FIBER OPTICAL DIGITAL SPECTROMETER BTC-110S

Urgency of the research. *Spectral instruments are widely used in scientific and applied optical research. Modern spectral instruments in many cases are digital. The development of application software for digital spectral instruments is an urgent task.*

Target setting. *Typically, companies that manufacture spectral equipment supply digital spectral instruments and application software as a set. In some cases, the use of this software is tied to a specific platform. The application software for the BTC-110S spectrometer has similar features. In addition, the software that comes with the devices may not include the necessary spectral data processing procedures for optical studies.*

Actual scientific researches and issues analysis*. Currently, one of the most popular programming languages is Java. Recently, the cross-platform program ST_Complex, an application software for the BTC-110S spectrometer, has been developed in the Java programming language.*

Uninvestigated parts of general matters defining*. The ST_Complex program has several limitations. It allows the BTC-110S spectrometer to record radiation spectra only in a single mode. In addition, when processing spectral data, it is not possible to find the results of multiplying and dividing the spectra into each other, as well as determining the correlation spectrum and its correspondence coefficient.*

The research objective*. In this work, the task was to develop a Java application that can be used for recording radiation spectra in a single and continuous mode with the BTC-110S spectrometer, as well as for quantitative comparison and processing of spectral data of objects of study using arithmetic operations. Moreover, to compare the spectra of optical radiation sources, use the coefficients of correspondence of their difference and correlation spectra.*

The statement of basic materials*. The features of functioning and the graphical user interface of a Java application that solves the problem are described. Examples of its use are given.*

Conclusions. *A cross-platform application software has been developed for recording radiation spectra in a single and continuous mode with the BTC-110S spectrometer, as well as for quantitative comparison and processing using arithmetic operations of spectral data of research objects. When comparing the spectra of objects of study, the program determines the correspondence coefficients for their difference and correlation spectra.*

Keywords: *spectrometer; spectrum; application software.*

Fig.: 5. References: 8.

Точилін Сергій Дмитрович – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних систем та мереж, Національний університет «Запорізька політехніка» (вул. Жуковського, 64, м. Запоріжжя, 69093, Україна).
Tochilin Sergei – PhD in Physico-Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Computer Systems and Networks, Zaporizhzhia Polytechnic National University (64 Zhukovsky Str., 69063 Zaporizhzhya, Ukraine).
E-mail: tochnozp@gmail.com.
ORCID: http//orcid.org/0000-0003-2010-6358
Scopus Author ID: 6602607112

Точилін С. Прикладне програмне забезпечення для оптоволоконного цифрового спектрометра BTC-110S. *Технічні науки та технології.* 2020. № 3 (21). С. 154-162.

УДК 316.259+355.01
DOI: 10.25140/2411-5363-2020-3(21)-163-184

Віталій Зацерковний, Павло Савков, Ігор Пампуха, Ірина Синявська

ОЦІНКА ПЕРЕВАГ МЕРЕЖЕЦЕНТРИЗМУ ТА МЕРЕЖЕЦЕНТРИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ РОЗБУДОВИ ЗБРОЙНИХ СИЛ УКРАЇНИ

Актуальність теми дослідження. *Зважаючи на зміни характеру ведення сучасних війн і шляхи досягнення інформаційної переваги над супротивником, дослідження мережецентричних технологій є надзвичайно актуальним. Підвищення маневреності підрозділів, їхньої здатності до виконання бойових завдань на підставі безперервного інформаційного супроводження дає можливість отримати значну перевагу над противником, попереджувати, запобігати та знешкоджувати реальні та потенційні загрози національній безпеці.*

Постановка проблеми. *Сучасний рівень автоматизації, інформатизації та системи управління Збройних сил України за сукупністю значень характеристик своїх основних складових частин не відповідає сучасним вимогам*

Аналіз останніх досліджень і публікацій*. Розглянуто проблематику зовнішніх інформаційних впливів та інформаційних аспектів забезпечення національної безпеки держави, концептуальні проблеми війни й миру та проблему мережецентричних війн.*

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. *Основною проблемою застосування принципів мережецентризму під час організації сучасного бою є недостатньо ефективні та неадаптовані до сучасних вимог інформаційні системи.*

Постановка завдання. *Першочерговим завданням є формування ефективної інформаційної системи на основі мережецентричних технологій, що дозволить скоротити час на прийняття рішення та прогнозувати можливі варіанти розвитку ситуацій та запобігати можливим наслідкам.*

Виклад основного матеріалу. *Завдяки прогресу у сфері інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ) з'явились нові зразки високоточної зброї, сучасні засоби розвідки, автоматичні і автоматизовані системи управління (АСУ) військами та зброєю. Комп'ютерні технології дали можливість керувати зброєю на відстані в кілька тисяч кілометрів, формувати високоточні точкові удари, корегувати дії військових підрозділів, здійснювати дії військових формувань відразу в декількох напрямках з метою знищення об'єктів супротивника або захоплення його території, досягати результату за короткий проміжок часу тощо. Необхідність максимального використання можливостей всіх наявних засобів розвідки і бойових платформ спричинила перехід від платформоцентричної моделі управління військами і зброєю, де основний акцент робився на кількість озброєння та військової техніки, до мережецентричної.*

Висновки відповідно до статті. *Визначена роль мережецентричних війн та їхній вплив на розвиток збройних сил передових в економічному сенсі країн. Застосування мережецентричних підходів спричинило появу чималих нових нетрадиційних форм і способів збройної боротьби, таких як «спеціальна операція», «тривимірна повітряно-наземна форма удару по супротивнику», «далекій вогневий бій» тощо, під час яких кораблі і підводні човни, літаки, космічні апарати, безпілотні літальні апарати (БПЛА), танки, польові радіостанції і портативні комп'ютери тощо спільно використовували інформацію за допомогою єдиних інтерфейсів, стандартів і протоколів. Визначені складові високої ефективності мережецентричних війн.*

Ключові слова: *інформаційна перевага; єдиний інформаційний простір; мережецентризм; мережецентрична система управління; мережецентрична війна.*

Рис.: 8. Бібл.: 42.

Актуальність теми дослідження. Розвиток людства наприкінці XX ст. ознаменувався глобалізацією та інформатизацією, які спричинили широкомасштабні зміни в економічній, соціальній, політичній, науково-технічній, культурній сферах та стрімкий розвиток інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ). Відбулось формування нового типу суспільних відносин та становлення інформаційного суспільства, де більшість працюючого населення зайняті виробництвом, збереженням, переробкою та реалізацією інформації, особливо її найвищої форми – знань [1]. Характерними особливостями цього суспільства стали революційні зміни в інформаційному менеджменті, діджиталізація (від англ. *digital* – цифровий), у результаті застосування якої більшість засобів комунікації та фіксації зовнішнього світу стали цифровими, швидкий розвиток робототехніки, штучного інтелекту, віртуальної реальності, інформаційних мереж і розвиненої інформаційної інфраструктури, вільний доступ людства до інформації, 3D-моделювання тощо.

Актуальність роботи зумовлена новими викликами, які постали перед людством взагалі та перед Україною зокрема в процесі глобалізації в усіх її вимірах та на всіх її рівнях. Автоматизація процесів повсякденної та бойової діяльності може підвищити бойові можливості військ (сил) на 15–30 % і одночасно на 50 % скоротити час, який витрачають органи управління на оперативне планування і доведення завдань до підлеглих. Проте нині збройні сили України (ЗСУ) надзвичайно повільно просуваються в цьому технологічному

© Зацерковний В. І., Савков П. А., Пампуха І. В., Синявська І. К., 2020

напрямку. Рівень автоматизації діяльності органів військового управління (ОВУ) ЗСУ становить лише 10–30 % від потреб. Наявні комплекси засобів автоматизації та програмно-технічні комплекси не складають цілісних систем, чинні інформаційно-розрахункові задачі забезпечують лише мінімальний набір функціональності – не більше за 12–15 % від загальної кількості елементарних функцій посадових осіб органів військового управління [2].

Особливої гостроти набули проблеми теоретичного осмислення та практичного впровадження стратегії різних форм інформаційного протиборства, інформаційних війн та військово-інформаційної безпеки в різноманітних контекстах конфліктного розвитку світової спільноти.

Постановка проблеми. Трансформація ІКТ збільшила інформаційний простір та просторові параметри сучасного соціуму, який уже не може обходитись без електронних текстових документів, миттєвого обміну повідомленнями (англ. *instant messaging*), цифрової форми подання об'єктів, використання інформаційних ресурсів та віртуалізації виробництва, конвергенції та динамізму соціальних процесів тощо.

Зміни, що відбулись і продовжують відбуватись в інформаційному суспільстві, зажадали перегляду старих парадигм управління з погляду прийняття рішень, їх виконання і контролю, оскільки ієрархічним системам управління властиві жорсткі механізми координації дій підпорядкованих сил і засобів, а зміст, швидкість доставки, формати і якість інформації головним чином визначаються процесами виконання формальних вимог управління.

Управління сучасними складними системами, кількість яких із кожним днем зростає, спонукає відмовитись від жорсткої ієрархії управління, вимагає координації дій самостійних суб'єктів у реальному часі, їх гармонічної взаємодії з оточенням, а також синергії знань, інтуїції та інтелекту всіх учасників щодо забезпечення функціонування таких систем. У цих умовах стає все важче отримувати необхідну інформацію, без опанування потужних можливостей, що надаються інформаційними мережами світу. Це спричиняє пошук нових оригінальних ідей і підходів до управління в термінах самоорганізації, хаосу, динаміки складних систем, управління знаннями і колективного інтелекту. Як наслідок, виникла концепція і теорія мережецентризму та поява мережецентричних систем управління.

Основна ідея концепції мережецентричного управління лежить у підвищенні ефективності інформаційного забезпечення процесів управління.

Ефективність мережі зростає лінійно зі зростанням кількості її елементів і експоненційно – зі зростанням кількості зв'язків між ними. Впровадження в організаційну структуру системи управління мережевих елементів дозволяє підсилити взаємодію між окремими її ланками і зробити їх більш інформаційно насиченими. Раніше це зробити було неможливо, оскільки складність і заплутаність таких організаційних структур могли не тільки загальмувати, а часом і взагалі паралізувати процес управління [3].

Перевага ідей мережецентризму спричинила їхнє повсюдне впровадження майже у всі сучасні технології (інформаційні, соціально-гуманітарні, мобільно-комунікативні, системи швидкого обміну повідомленнями, блоги, соціальні мережі, мережеві онлайн-ігри тощо). Не були осторонь від впровадження і збройні сили (ЗС) передових країн. На базі новітніх інформаційних розробок стали з'являтись нові програмні, апаратні та сенсорні рішення, які дозволили скоротити цикл бойового управління, надавати командирам різного рівня та підрозділам на полі бою можливість перебування у стані «ситуаційної обізнаності» з чітким усвідомленням та фіксацією власного розміщення та завдань, місця та дій дружніх підрозділів, розташування та прогнозованих оцінок дій ворога. З'явились нові види високоточної зброї, засоби розвідки, автоматизовані системи управління (АСУ) військами та зброєю, нові концепції ведення війн і збройних конфліктів. Йде постійний процес удосконалення форм і способів застосування військ.

Інтеграція учасників бойових дій, об'єктів і пунктів управління військами і зброєю в єдиний інформаційний простір (ЄІП) дала можливість одержання синергетичного ефекту за рахунок повного використання доступних інформаційних ресурсів, підвищення якості взаємодії та рівня самосинхронізації та оперативності управління підпорядкованими силами й засобами, бойовими засобами і платформами [4; 5].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Теоретичні засади проблем забезпечення національної безпеки України викладено в працях учених О. Бодрука, Ю. Бута, О. Власюка, В. Горбуліна, А. Качинського, В. Крисаченка, О. Маначинського, М. Ожевана, Б. Парахонського, С. Пирожкова, Г. Сащука, Т. Стародуб, В. Телелима, В. Толубко, В. Циганова, О. Шевченка та ін.

Проблема зовнішніх інформаційних впливів та інформаційних аспектів забезпечення національної безпеки держави досліджувалась у працях: В. Бондаренка, Дж. Брауна, О. Вусатюка, Г. Джоветта, Д. Дубова, С. Кара-Мурзи, О. Литвиненка, А. Манойла, С. Недбаєвського, М. Ожевана, В. Петрика, Г. Почепцова. Серед закордонних авторів слід звернути увагу на дослідження Г. Почепцова, З. Бжезінського, Дж. Ная, Д. Белла, М. Кастельса, Д. Дарендорфа, К. Дойча, Г. Джоветта та інших.

Концептуальні проблеми війни і миру розглядаються в працях: Р. Арона, К. Гаджієва, К. Клаузевіца, Б. Ліддел-Гарта, Н. Макіавеллі, Х. Мольтке, К. Поппера, П. Прудона, Є. Рибкіна, С. Тюшкевича, М. Цюрупи, А. Швейцера та ін.

Із суто методологічного погляду проблему мережецентричних війн досліджували А. О. Зінченко, В. І. Слюсар, K. Cebrowski, Garstka John J., D. S. Alberts, А. А. Амбарцумян, Ю. С. Затуливетер, Дж. Арквілла та інші.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Прогрес у створенні та вдосконаленні озброєння та військової техніки завжди здійснював істотний вплив на війни та форми їх ведення [6]. Розробка озброєння, його модернізація, як свідчить історія, завжди йшли від засобів індивідуального до засобів групового, а згодом і масового ураження, а військової техніки – шляхом створення і вдосконалення бойових платформ, від стародавніх колісниць та бойових слонів, до сучасних танків, бронетранспортерів, літаків, кораблів, підводних човнів, ракетних комплексів різного типу та космічних засобів.

На той час цілком виправданим був підхід підрахунку танків, літаків, підводних човнів, артилерійських гармат, авто- і мототехніки, кількості бійців тощо. У кого більше таких ресурсів, той і сильніше. Але сьогодні в армії конкурують уже не стільки активи, скільки моделі управління, де ключова роль належить двом складовим: інформації та часу. Час та інформація – це нематеріальні активи нарощування бойового потенціалу. У підсумку більш стійким є той, хто має більше інформації, швидше її обробляє, швидше приймає рішення і завдає свій удар у найбільш вразливе місце ворога. Збройні сутички, по суті, стають протиборством пунктів і центрів бойового управління й командних систем загалом. Конкурують уже не платформи, якими б сучасними вони не виглядали. Танки, БТР, артилерійські та ракетні системи так і будуть мертвим металом, якщо їхні розрахунки та екіпажі не зможуть отримати бойове завдання відповідно до ситуації. Засоби розвідки, зв'язку, цілевказівки, ураження також втрачають свою автономну самодостатність. Конкурують моделі та системи управління. Адже тільки в сучасній системі управління військами можна забезпечити кардинальний приріст бойових можливостей. Саме тому сьогодні у ЗС передових країн світу широко застосовується підхід на базі C4ISR (command, control, communications, computers, intelligence, surveillance and reconnaissance), який і позначає взаємопов'язане існування та розвиток систем управління, зв'язку й розвідки на основі автоматизації процесів взаємодії.

Постановка завдання. Розробка концепції ГІС ВП, підходів щодо її створення, інтеграція ГІС ВП з технологіями ДЗЗ, розробка алгоритмів моніторингу інформаційного простору є першочерговими завданнями в розбудові сучасної української армії.

Об'єкт дослідження – інформаційне середовище функціонування збройних сил.

Предмет дослідження – підходи щодо ведення війн і військових конфліктів.

Мета роботи – оцінка переваг мережецентризму та мережецентричних війн.

Виклад основного матеріалу. Вплив розвитку засобів зв'язку на систему управління військами і зброєю представлений на рис. 1. Динаміка змін об'ємів передачі інформації в тактичній ланці управління з розвитком засобів зв'язку представлена на рис. 2.

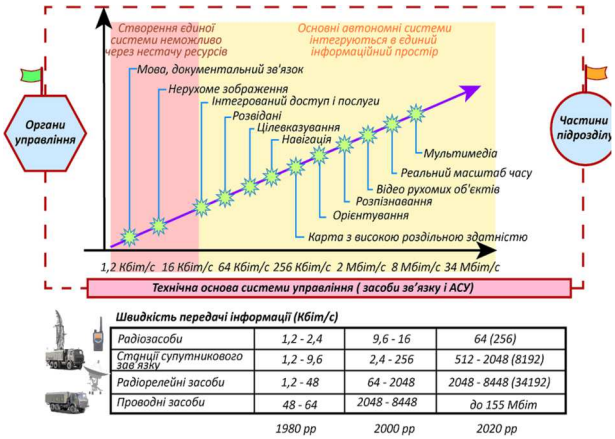


Рис. 1. Вплив розвитку засобів зв'язку на систему управління військами і зброєю [7]

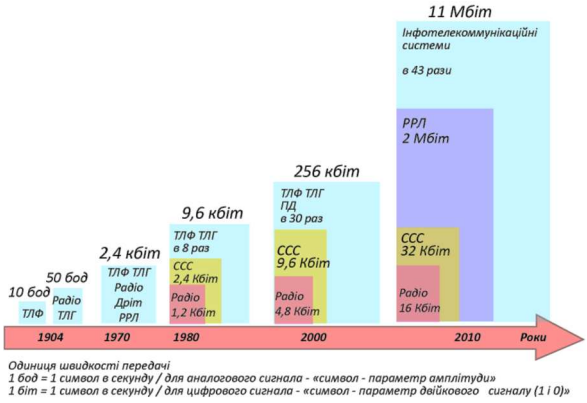


Рис. 2. Динаміка змін об'ємів передачі інформації в тактичній ланці управління з розвитком засобів зв'язку [7]

Рівень розвитку інформаційних технологій, наявність сучасних озброєнь, військової техніки та бойових платформ підвищив ефективність їх застосування на полі бою. Завдяки прогресу у сфері ІКТ з'явились нові зразки високоточної зброї, сучасні засоби розвідки, автоматичні й автоматизовані системи управління військами та зброєю. Комп'ютерні технології дали можливість керувати зброєю на відстані в кілька тисяч кілометрів, формувати високоточні точкові удари, корегувати дії військових підрозділів, спрямовувати дії військових формувань одразу в декількох напрямках з метою знищення об'єктів противника або захоплення його території, досягати результату за короткий проміжок часу тощо. При цьому противник може і не бачити нападника. Сучасні розвідувальні супутники оптичного, інфрачервоного, радіо- і радіотехнічного діапазонів зйомки дозволяють здійснювати безперервне і всепогодне спостереження за територією противника, передаючи розвідані в центри їх обробки практично в масштабі реального часу. Різного роду радіолокаційні станції, в тому числі наземні й повітряні станції дальнього радіолокаційного виявлення (ДРЛО) систем протиракетної і протиповітряної оборони (ПРО і ППО), дозволяють виявляти засоби озброєння противника на великих відстанях, у тому числі за горизонтом [8]. Сьогодні вже навіть сучасного бійця, озброєного стрілецькою зброєю із запасом патронів, підствольним гранатометом і ручними гранатами та із засобами спостереження і зв'язку для обміну інформацією, вважають бойовою платформою, правда з обмеженою вогневою міццю. Але проблеми в системі управління військами часом нівелювали цей прогрес, оскільки час від моменту одержання розвідданих, їх обробки, передачі органам управління для подальшого розрахунку й корегування цілевказівок і до моменту одержання ударними засобами даних про цілі виявлявся неспівставним з очікуваною динамікою бойових дій. А строго централізований та ієрархічний шлях проходження розвідувальної і командної інформації практично зводив нанівець потенційні ударні можливості різного роду бойових платформ [9].

Отже, бурхливий розвиток інформаційних технологій, якісні та кількісні зміни озброєння і військової техніки, засобів розвідки і спостереження за противником, необхідність удосконалення засобів автоматизації систем управління, зв'язку і передачі даних на межі століть привели до усвідомлення необхідності зміни форм і методів управління збройної

боротьби. Крім того, як свідчив досвід, у ході війн і збройних конфліктів дедалі частіше виникла необхідність раціонального використання бойової потужності різного типу бойових платформ зі звичайною зброєю, розкриття всіх їх потенційних можливостей. Стало очевидним, що успіх уже не міг забезпечуватись одним видом зброї: перемога потребувала злагодженої взаємодії всіх видів і родів військ – флоту, авіації, ракет середньої і малої дальності, артилерії, танків і піхоти [10-14].

Ефективне управління всіма видами й родами військ стало вимагати інтеграції наявних різнорідних АСУ військами і зброєю в єдину завадостійку систему управління і зв'язку для одержання інформаційної технічної переваги над противником, яка б ґрунтувалась на трьох складових: оперативному одержанні інформації, адекватному розумінні ситуації в бойовому просторі, ефективному використанні кожної бойової платформи. Наявність великої кількості різноманітної інформації про противника і свої сили та засоби на різних рівнях управління також вимагало подальшого розвитку систем і засобів збору, збереження та обробки інформації, її аналізу, оцінки й моделювання розвитку сценаріїв розвитку бойової обстановки, підготовки командуванням варіантів найбільш ефективних управлінських рішень, тобто досягнення інформаційної переваги над супротивником.

Одним із перспективних шляхів досягнення інформаційної переваги стало створення комплексів інформаційних мереж – технічної основи АСУ військами і зброєю та організація горизонтальних і вертикальних зв'язків для забезпечення обміну даними між будь-якими об'єктами в зоні бойового простору в реальному часі.

Наприкінці XX – початку XXI ст. на Заході почали активно розроблятись нові концепції війн – концепція асиметричної війни (англ. *asymmetric warfare*), конфлікт із нульовою сумою, конфлікти з ненульовою сумою, конфлікти з від'ємною сумою, конфлікти малої інтенсивності, м'якої сили, технології керованого хаосу, мережецентричної війни (МЦВ, англ. *Network Centric Warfare – NCW*), багатодоменного протистояння (англ. *Multidomain battle, MDB*) тощо, удосконалюватись форми і способи застосування військ.

Серед цього розмаїття концепцій досить перспективною виявилась концепція МЦВ, яка не тільки завоювала своїх чисельних прихильників, але й була прийнята за основу діючих програм розвитку та удосконалення ЗС багатьох передових в економічному сенсі країн світу і на сьогодні вже пройшла практичну апробацію в ході реальних військових конфліктів. Проте широко уживаний термін МЦВ є некоректним перекладом з англійської мови терміна «network-centric warfare (NCW)» – мережецентричні військові дії [15], оскільки йдеться не про нову форму або способи ведення військових дій (хоча принципово не виключається їх поява, наприклад, інформаційний вплив, інформаційна атака, інформаційна битва, інформаційна операція тощо), а про мережецентричний підхід до організації і ведення таких дій. Але оскільки термін МЦВ вже «прижився», то завдання полягає не в тому, щоб його змінити, а в тому, щоб його правильно розуміти і вживати.

Мережецентричність – комплексна властивість системи, що включає в себе різні компоненти: інфраструктуру, платформи, підсистеми, процеси і людей по стійкій глобально взаємозв'язаній інформаційно-мережевій взаємодії, при якій інформація для її спільного використання надається компонентам системи своєчасно і безшовно [16].

Сучасному розумінню мережецентризму передує велика кількість етапів, пов'язаних з об'єднанням пунктів управління (ПУ) і зв'язку, автоматизованих систем управління та обчислювальної техніки, їх підключення до вже сформованої мережі управління озброєнням, різноманітних засобів розвідки, високоточної зброї, а також зв'язку і передачі даних, здатних інтегруватися в уже розгорнуту систему управління на театрі війни й забезпечувати доведення інформації до користувачів у реальному часі.

Мережецентрична система управління – система управління розподіленою інформаційною системою, в якій її базові елементи (сили і засоби спостереження, АСУ й особи,

що приймають рішення (ОПР), а також підпорядковані сили і засоби, об'єднані в ЄІП. При цьому така система управління характеризується принципами відкритості, самоорганізації, слабкої ієрархії в контурі прийняття рішень і здатністю породжувати цілі всередині себе. Така інтеграція підвищує можливості інформаційної взаємодії і робить неефективними існуючі способи дестабілізуючого впливу, орієнтовані на придушення або ураження окремих елементів системи управління. Це відбувається через те, що ці способи переважно спрямовані на порушення процесів передачі даних, характерних для ієрархічних систем управління. При мережецентричному підході ці дії є неефективними, завдяки створенню високозв'язного мережевого середовища в складі єдиного інформаційного простору (ЄІП), коли для передачі інформації можна використовувати безліч шляхів, при цьому порушення функціонування окремих ліній або підмереж зв'язку не буде критичним для порушення управління мережецентричної системи загалом.

Фактично, мережецентричні системи управління – це матричні інформаційно-керуючі системи, в основі яких лежить глобальний інформаційний взаємозв'язок її елементів [17]. Для такої системи характерними є не тільки вертикальна інтеграція між силами й засобами спостереження, ПУ і підпорядкованими силами і засобами, але й розгалужена мережа горизонтальних зв'язків на тому ж самому рівні управління між різнорідними елементами системи, які є джерелами і споживачами інформації, що циркулює в системі [17].

Аналіз війн і військових конфліктів кінця XX – початку XXI століть засвідчив, що основними факторами, які впливали на збройну боротьбу, стали фізико-географічні умови ведення збройної боротьби, розвиток засобів збройної боротьби, особливості підготовки повітряно-наступальних та повітряно-наземних наступальних операцій. Характерною тенденцією проведення операцій стало залучення багатонаціональних сил. Особливого значення набув підготовчий період, який об'єднав повітряно-морську транспортну, розвідувальну операції, операцію з забезпечення життєдіяльності військ. Характерним для цього часу стала демонстрація сили (зосередження вздовж берегів імовірного супротивника значних сил флоту, проведення широкомасштабних навчань, перебазування авіації на передові аеродроми тощо), який тривав близько п'яти місяців [18].

Військові конфлікти (війни) у Перській затоці (1991 р. – операція «Буря в пустелі», 2003 р. – операція «Свобода Іраку»), в Югославії (1999 р. – операція «Союзницька сила»), в Афганістані 2002 р. – «Непохитна свобода»), Сирії (2016-2020 рр.) стали конфліктами високих технологій та набули специфічних рис: рішучості в досягненні політичних цілей, спрямування на параліч систем державного, військового управління і критичної інфраструктури супротивника, динамічності, швидкоплинності, високої технологічності застосовуваних засобів. Вирішальне значення для досягнення перемоги стало застосування багатонаціональними силами засобів збройної боротьби, створених на базі новітніх технологій, зокрема безпілотних літальних апаратів (БПЛА), керованих авіаційних засобів ураження, засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ), розвідки, автоматизованого управління військами та зброєю [19; 20].

Досвід ведення бойових дій регулярними військами проти іррегулярних збройних формувань засвідчив, що застосування військ мало певні особливості:

– по-перше, виконання завдань здійснювалось об'єднаннями військ різновидової і різновідомчої належності за відсутності чітко вираженої лінії фронту на розрізнених, нерідко ізольованих напрямках, у відриві з'єднань, частин і підрозділів від головних сил при високому ступені самостійності в умовах, коли супротивник широко застосовував засади, партизанські способи боротьби, нічні дії і зазвдавав раптові удари;

– по-друге – поставлені завдання вирішувались шляхом переважно нетрадиційних способів, різними загонами і групами, сформованими за цільовим призначенням;

– по-третє – підготовка бою і управління з'єднаннями, частинами і підрозділами різко ускладнювалась унаслідок одночасного ведення бойових дій у декількох різних районах за наявності відкритих фронтів і розтягнутих тилових комунікацій.

Під час бойових дій з'явилось чимало нових нетрадиційних форм і способів збройної боротьби: «спеціальна операція», «тривимірна повітряно-наземна форма удару по супротивнику», «далекій вогневий бій» тощо, під час яких кораблі й підводні човни, літаки, космічні апарати, БПЛА, танки, польові радіостанції і портативні комп'ютери тощо спільно використовували інформацію за допомогою єдиних інтерфейсів, стандартів і протоколів [21].

Одним з елементів спеціальної операції стали спеціальні військові дії, що здійснювались загальновійськовими з'єднаннями, частинами у взаємодії з формуваннями інших силових структур. Їхнім змістом стали ізоляційно-обмежувальні, розвідувально-пошукові, ударно-вогневі і рейдово-штурмові операції, спрямовані на розгром незаконних збройних формувань. Поява даної форми тактичних дій обумовлена тим, що в збройних конфліктах традиційні види бою (наступ і оборона) уже не охоплювали весь зміст збройного протиборства з іррегулярними формуваннями противника [22].

Потрібно також відзначити ефективну організацію багатонаціональними силами коаліції радіоелектронного придушення об'єктів супротивника. Новим елементом у РЕБ стало руйнування телевізійних передавальних центрів і радіомовних станцій. Актуальними стали такі форми дій, як «електронний удар», «електронний наступ», «операція з виведення із ладу автоматизованих, комп'ютерних систем управління» тощо.

Таким чином, необхідність максимального використання можливостей всіх наявних засобів розвідки і бойових платформ спричинила перехід від «платформоцентричної» моделі управління військами і зброєю, де основний акцент робився на кількість озброєння та військової техніки, до «мережецентричної» (рис. 3), яка являє собою сталу систему поглядів на військово-технічне забезпечення та ведення бойових дій в умовах тотальної комп'ютеризації сил і засобів збройної боротьби.

Узагальнена структура мережецентрчної системи управління представлена на рис. 4, де абревіатура ТКМ позначає телекомунікаційні мережі.

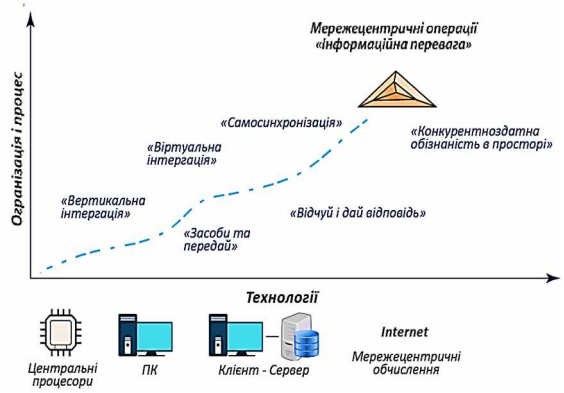


Рис. 3. Еволюція технологій і перехід до мережецентричних операцій [23]

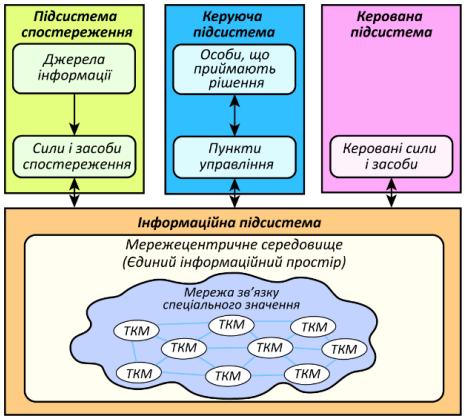


Рис. 4. Узагальнена структура мережецентричної системи управління [24]

Термін «мережецентризм» уперше з'явився в американській комп'ютерній індустрії і став результатом прориву в інформаційних технологіях, який дозволив організувати інтероперабельну взаємодію між комп'ютерами, незважаючи на використання в них різних операційних систем спочатку у США а потім і в усьому світі.

Цілком природно, що й ідеологами військового застосування цього терміна також стали американці. У середині 1990-х років група співробітників корпорації «РЕНД» під керівництвом Дж. Аркілли і Д. Ронфельдта розробила підходи щодо ведення мережевих війн (МЦВ), які вони виклали у статті «Пришестя мережевої війни» [25].

Подальша розробка теорії МЦВ (emerging theory of war) пов'язана з іменами колишнього міністра оборони США Дональда Рамсфелда і військового чиновника Пола Вулфовіца. Безпосередніми розробниками концепції МЦВ вважаються віцеадмірал Артур К. Сібровські – керівник Офісу реформування ЗС США (Office of the Force Transformation) і науково-технічний радник управління систем С4 (Командування, управління, зв'язок, комп'ютерні мережі) Об'єднаного штаба ЗС США Джон Гарстка, які перші використали термін «мережецентричний» (Network Centric) і опублікували основні положення концепції в журналі «Proceedings» у січні 1998 р. у статті «Мережецентрична війна: її походження і майбутнє». Себровскі і Гарстка побудували свою публікацію на прикладах із галузі економіки, включаючи фінансовий сектор, і деяких позитивних результатах з проведених реформ, наприклад, зміни структури і методів роботи поліції Нью-Йорка. Вони зазначали, що МЦВ і пов'язані з нею революції у військовій справі відбуваються і черпають свою енергію з кардинальних змін в американському суспільстві. Попереду цих змін знаходяться коеволюція економіки, інформаційних технологій, бізнес-процесів і організацій, а вони зв'язані одне з одним трьома темами:

– зміщенням акценту з платформи на мережу;

– перехід від розгляду діючих осіб як незалежних суб'єктів до їх розгляду як частини екосистем, що постійно адаптуються;

– важливість прийняття стратегічних рішень, спрямованих на адаптацію або навіть виживання в таких змінюваних екосистемах.

Доопрацьована і детально представлена концепція була опублікована в праці [25].

Концепція МЦВ була прийнята і реалізована на практиці Пентагоном як доктрина і польовий статут під час президентства Дж. Буша-молодшого (2001-2009 рр.).

Ключовим поняттям концепції МЦВ є «мережа» (англ. *the network*), новий інформаційний простір, де розгортаються основні стратегічні операції як розвідувального, так і військового характеру, а також їхнє медійне, дипломатичне, економічне і технічне забезпечення. Війна стає мережевим явищем, а військові дії – різновидом мережевих процесів. Регулярна армія, всі види розвідок, технічні відкриття, високі технології, журналістика і дипломатія, економічні процеси і соціальні трансформації, цивільне населення і кадрові військові регулярні частини і окремі слабо оформлені групи – усе це інтегрується в єдину мережу (в єдиний інформаційний простір, ЄІП), де циркулює інформація.

З технічного погляду в основу концепції МЦВ покладені стандартизація, уніфікація та комплексне впровадження новітніх інформаційних технологій, що дозволяє створити єдиний інформаційно-комунікаційний простір. Як наслідок, відбувається інтеграція складових інформаційного простору з мережами засобів ураження, бойового і тилового забезпечення, засобів розвідки і контррозвідки, зв'язку, органів управління формування громадської думки, дипломатичних відомств, релігійної, колективної і етнопсихології, економічного забезпечення, академічної науки, технічних інновацій моніторингу соціальних процесів тощо, між якими здійснюється постійний інформаційний обмін. Доступ до інформації в ЄІП регламентується відповідними повноваженнями.

Інтеграція сенсорів (датчиків, джерел даних), осіб, що приймають рішення та виконавців, забезпечило доведення до учасників дій необхідної інформації про ситуацію, прискорило процес управління силами і засобами і сприяло підвищенню темпів проведення військових операцій, маневреності військ і ефективність ураження супротивника їх ситуаційну боєздатність і, врешті-решт, бойову міць [26].

Швидкість прийняття рішень є процесом, при якому позиція інформаційної переваги перетворюється в конкурентну перевагу.

Концепція МЦВ – це не тільки розгортання цифрових мереж з метою забезпечення як вертикальної, так і горизонтальної інтеграції всіх учасників операції. Це ще і зміна тактики дії перспективних формувань із розосередженими бойовими порядками, оптимізація способів розвідувальної діяльності, спрощення процедур узгодження та координації вогневого ураження, а також деяке нівелювання розмежування засобів між ланками управління.

Підвищення бойових можливостей сучасних формувань – прямий наслідок поліпшення інформаційного обміну і зростання ролі самої інформації, тобто реалізації принципів нової концепції. Це нова форма і спосіб управління ЗС в організації і веденні бойових дій, де в центрі уваги виявляється мережа, найбільшим важливим аспектом якої є принципи організації і багато в чому самоорганізації (самосинхронізації), під якою розуміють здатність військової структури самоорганізовуватись знизу, а не змінюватись згідно з указівками зверху.

Жорстка ієрархічна система військового управління замінюється гнучкою мережевою: підпорядковані військові формування отримають свободу у виборі методів дій, а організаційно-штатна структура військ передбачає постійні зміни, адаптування до вимог обстановки на полі бою [15].

Мережецентричні дії засновані на доступі командира до всієї необхідної йому інформації режимі реального часу, за рахунок створення спеціальної мережі, яка дозволяє йому одержувати всю необхідну інформацію і віддавати накази. Це ключовий момент у цій концепції, оскільки за допомогою комп'ютера і зв'язку, командир може одночасно швидко з'єднуватися й бачити кожний військовий підрозділ, кожну бойову платформу, бійця, знати, що він бачить, що чує, що робить. Відповідно підрозділи, платформи й окремі бійці можуть бачити ситуацію на полі бою. Також завдяки силам розвідки в них є змога бачити і противника, де він перебуває і в якій кількості. Водночас противник навіть не здогадуватиметься, що його вже повністю розвідали. І кожної секунди командир може контролювати все поле бою [27].

Як відомо з теорії системного аналізу, об'єднання декількох систем, за умови належної взаємодії (зв'язків) дозволяє досягти синергетичного (емерджентного) ефекту, який набагато перевищує суму компонентів її складових і забезпечує три умови успіху на полі бою: беззаперечну перевагу в розвідданих про бойовий простір, практично безпомилкова постановка бойових задач, миттєва й усебічна оцінка ситуації.

Збройні сили, об'єднані надійними інформаційними мережами, отримали можливість якісно нового обміну інформацією, що підвищило якість інформації і рівень загальної інформованості про ситуацію на полі бою (театрі бойових дій), забезпечило такий рівень співробітництва і самосинхронізації, який дозволив підвищити завадостійкість і швидкість передачі команд управління та підвищити ефективність виконання бойових задач. За рахунок інформаційного обміну та зростання значення самої інформації відбулось підвищення можливостей військових формувань щодо вогневого ураження сил супротивника, зростання їх мобільності, ефективності управління силами й засобами мережецентричних сил і врешті-решт, зростання темпів операцій, рівня самосинхронізації бойових дій тощо [28].

Збільшення бойової потужності географічно (просторово) розосереджених, добре екіпірованих і матеріально оснащених військових формувань (мережецентричних сил) відбувається за рахунок утворення переваг в інформаційному протиборстві за рахунок широкого застосування автоматизованих систем управління військовими формуваннями наземного, морського, повітряного і космічного базування, розвідки, моніторингу, РЕБ

наземного, морського, повітряного і космічного базування, зброєю, засобами розвідки тощо й полягає в інтеграції всіх вражаючих, логістичних, інформаційних, дипломатичних, соціальних та інших засобів у мережецентричну систему, яка містить у собі всі рівні й напрями управління [29].

МЦВ може вестись на всіх рівнях військових дій – тактичному, оперативному і стратегічному. Принципи її ведення жодним чином образом не залежать від географічного регіону, бойових задач, складу і структури використовуваних військ.

У концептуально-теоретичному плані Себровскі і Гарстка представили мережецентричну модель у вигляді системи, що складається з трьох підсистем-решіток – глобальної інформаційної, сенсорної (розвідувальної) і бойової (засоби ураження, бойова техніка і особовий склад окремих тактичних підрозділів та бойового управління) і які взаємно перетинаються. Графічна інтерпретація мережецентричного підходу представлена на рис. 5 [31]. Складові схема моделі представлена на рис. 6 [31].

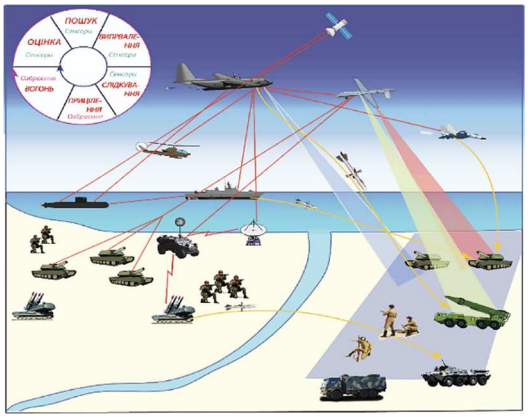


Рис. 5. Мережецентрична концепція ведення бойових дій

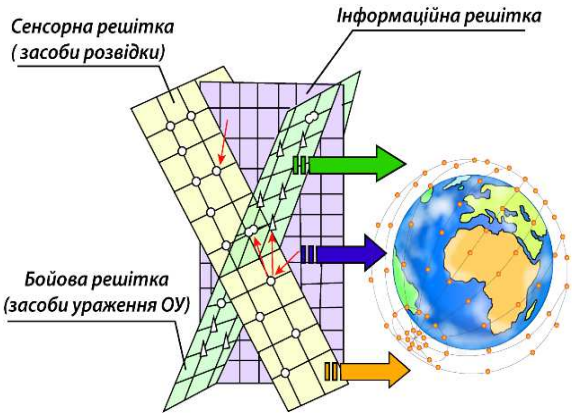


Рис. 6. Складові мережецентричної моделі

Основу ЄІП становить так звана «Глобальна інформаційна решітка» (ГІР, англ. *Global Information Grid – GIG Centric Warfare – NCW*), яка забезпечує командування ЗС можливістю управління військами в бойових умовах на основі інформаційно-керуючих систем. Функціонування ГІР забезпечує потужне угрупування розвідувальних, комунікаційних і навігаційних космічних літальних апаратів на навколоземній орбіті. Це гарантує успішне ведення бойових дій проти супротивника, у якого відсутні подібні системи. Значну частину такої інформації складає космічна інформація, яка є базовою для геоінформаційних систем військового призначення (ГІС ВП) системи підтримки прийняття рішень у бойовій і мирній обстановці.

ГІР поєднує всі сили і засоби ЗС країни евентуального супротивника та її союзників в єдину систему управління, розвідки, вогневого ураження, логістики й забезпечує їх всією необхідною інформацією для ведення війни. ГІР покликана забезпечити абсолютне інформаційне домінування на полі бою, що, у свою чергу, дозволить випередити противника на всіх етапах підготовки і ведення бойових дій [15] є наскрізною (end-to-end), тобто забезпечує можливість накопичення безлічі інформації, її збереження, розповсюдження та надання за запитами. При цьому доступ до повідомлень мають тільки користувачі, що зареєстровані в мережі, для інших, зокрема й передавальних серверів, інформація є недоступною.

ГІР пронизує собою всю систему сучасного управління ЗС США і виступає її основою та містить власні й орендовані комунікації, комп'ютерні системи і сервіси, програмне забезпечення (включаючи додатки), дані, сервіси безпеки, інші пов'язані сервіси і національні системи безпеки США.

У технічному плані перед МО США в особі Агентства з перспективних військових розробок – DARPA, поставлена задача до 2020 року в режимі реального часу поєднати процеси: дешифрування об'єктів супротивника, їх географічну прив'язку, видачу цілевказівок і знищення об'єктів. При цьому для космічної інформації геометричний параметр об'єкта по прив'язці й розміру не повинен перевищувати 1 метр.

Елементами сенсорної решітки виступають засоби розвідки (сенсори або датчики, інформаційні агенти тощо), а елементами бойової решітки є засоби ураження (стрільці). Ці дві групи елементів об'єднуються органами управління і командування.

Зв'язки і відносини між усіма елементами підсистем і самими підсистемами доволі складні й багатопланові, що дозволяє, наприклад, «стрільцям» уражати цілі одразу після отримання інформації від «сенсорів», після отримання наказу від органів управління, або в деяких випадках самостійно [15].

Основним змістом сучасних МЦВ стають спільні центрально-мережеві операції, що являють собою зону боїв і ударів, виконуваних ЗС розосередженими по всьому просторі театру військових дій (ТВД) взаємозв'язаними (єдиним задумом, оперативно, інформаційно тощо) і взаємозалежними різнорідними тактичними формування ЗС.

Головні характерні компоненти розосереджених по всьому ТВД ЗС:

– високоефективна «інформаційна решітка»;

– доступ до всієї необхідної інформації;

– високоточна зброя;

– високоефективна система управління і зв'язку;

– інтегрована «сенсорна решітка», з'єднана в єдину мережу із системою засобів ураження та системою управління і зв'язку.

Активне використання даних отриманих за допомогою аерокосмічної розвідки, безпілотних літальних апаратів (БПЛА), високоточної зброї, захищених стійких каналів зв'язку з високою пропускною спроможністю, засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ) дозволяє завдавати безперервні удари по супротивнику з далеких відстаней. При цьому відбувається розгортання комп'ютерних (інформаційних) мереж з метою забезпечення як вертикальної, так і горизонтальної інтеграції елементів бойової побудови, зміна тактики дій військових формувань із розсердженими бойовими порядками, оптимізація способів розвідувальної діяльності, спрощення процедур узгодження та координації вогневого ураження, безперервний оптимальний розподіл цілей і вироблення цілевказівок у зоні відповідальності підрозділу (бойової одиниці), а також нівелювання розмежування засобів по ланках управління. Крім того, розосередженість військових формувань разом зі швидкістю дій мобільних сил дозволяє в реальному часі здійснювати зміни напрямків ударів і введення в оману командування ЗС супротивника, як про свої поточні наміри, так і про загальну оперативну обстановку.

Наразі у Міністерстві оборони США термін «мережецентричний» розуміють як характерну властивість надійного, глобально взаємопов'язаного мережевого оточення, що охоплює інфраструктуру, системи, процеси та людей і в якому дані для спільного використання надаються користувачам повністю та своєчасно [33].

Подальший розвиток концепції МЦВ привів до прийняття Програми FCS (Future Combat System). Головними напрямками наступної реорганізації ЗС США стали: об'єднання всіх систем управління і ведення бою в єдину армійську мережу і максимальна заміна живих солдатів і службовців на автоматизовані і роботизовані системи. А додатковою ціллю FCS, яка логічно випливає з основних, стала заміна техніки і озброєння на більш досконалі й технічо нові зразки з підтримкою роботи в єдиному армійському середовищі мережі [34].

Крім мережецентричної моделі організації і ведення бойових дій подібний підхід застосовується і при проєктуванні так званих мережецентричних інформаційно-керуючих систем (ІКС) спеціального призначення. Найбільш перспективним напрямом розвитку ІКС є матричні ІКС. В їх основі, як і в основі концепції МЦВ, лежить глобальна інформаційна решітка.

На думку розробників концепції, «мережецентричний» спосіб ведення бойових дій дає можливість здійснити перехід від війни на виснаження до швидкоплинної і більш ефективної форми ведення збройної боротьби, характерними особливостями якої є швидкість управління та самосинхронізація, тобто здатність військової структури самоорганізовуватись знизу, не очікуючи вказівок зверху [35]. Крім того, концепція МЦВ відповідає новим вимогам, умовам інформаційного суспільства й найближчим часом «якщо не замінить собою традиційну теорію війни, то істотно, якісно і безповоротно її змінить». Вона може застосовуватись як для мирного, так і для військового часу, охоплювати всі рівні управління, а принципи її ведення не залежать від географічного регіону, бойових задач, складу і структури ЗС. Самі ж ЗС у цьому випадку являють собою розгалужену мережу гарно інформованих, але географічно розподілених сил. МЦВ – не новий тип війни, а новий підхід до організації та ведення бойових дій, де в центрі уваги опиняється інформаційно-комунікаційна мережа. Мережецентричні військові дії характеризуються не тільки забезпеченням передачі розвідувальної інформації всім учасникам цих дій в реальному часі, але й високим рівнем організації (самоорганізації) функціонування елементів бойової побудови, яка проявляється в безперервному оптимальному розподілу цілей та вироблення цілевказівок у масштабі зони відповідальності [21]. Це ще і зміна тактики дій перспективних формувань із розосередженими бойовими порядками, оптимізація способів розвідувальної діяльності, спрощення процедур узгодження і координації вогневого ураження, а також певне нівелювання розмежування засобів по ланцюгах управління [36].

Висока ефективність МЦВ досягається:

– інформаційною перевагою шляхом штучного збільшення потреби супротивника в інформації при одночасному обмеженню доступу до неї; забезпеченню максимально можливого доступу до інформації своїх військових формувань через мережеві механізми й інструментарій зворотного зв’язку при надійному захисті від їх проникнення противника; забезпеченні доступу до широкого спектра оперативного й динамічного інформування;

– забезпеченням загальної поінформованості шляхом побудови інтегративної інформаційної мережі, яка передбачає постійну актуалізацію інформації, що отримується від різних видів розвідки та інших джерел одержання інформації; перетворенням користувачів інформації одночасно і в її постачальників, які одразу ж активують зворотний зв’язок; максимальним захистом доступу до цієї мережі противника при максимальній доступності до неї своїх військових формувань і платформ;

– заміну наказів командира загальними вказівками про завдання; підвищення автономності й самостійності підлеглих; уникненні строгої і однозначної формалізації управління;

– зменшенням циклу прийняття рішень та збільшенням швидкості їх передачі з метою досягнення оперативної переваги; блокуванням реалізації стратегічних рішень супротивника і забезпеченні своєї переваги в змаганні на рівні рішень;

– реалізацією самосинхронізації дій бойових підрозділів практично в автоматичному режимі, самостійному формулюванні і розв’язанні оперативних задач на основі загальної поінформованості і розуміння намірів командира, що істотно підвищує самостійність і творчу ініціативу командирів підрозділів;

– географічним розподілом сил шляхом переходу від лінійної конфігурації на полі бою до точкової конфігурації; контролюванням не величезних просторів, а найбільш важливих стратегічних районів; веденні наступу не фронтальними силами, а точковими підрозділами; забезпеченні високої взаємодії всіх сил для швидкісного маневру;

– демасифікацією, заснованою на використанні інформації для досягнення бажаних ефектів, обмеженням необхідності зосередження великих сил у конкретному місці; збільшенні швидкості й темпу переміщення на полі бою для того, щоб суттєво ускладнити супротивнику можливість своєчасного виявлення такого переміщення. Цей принцип війни вимагає збільшення кількості і якості інформаційних джерел як у районі бойових дій, так і поза ними. А це забезпечується за рахунок інтеграції в єдину систему даних, отримуваних розвідкою, системами моніторингу й розпізнавання, використанням сенсорів (датчиків) як головних маневрових елементів, так сенсорів морально-психологічного впливу [37];

– глибоким сенсорним проникненням, яке забезпечується збільшенням кількості і якості датчиків як у районі бойових дій, так і поза ним шляхом об'єднання в єдину систему даних, отримуваних розвідкою, системами спостереження та розпізнавання; постачанням кожної гармати різноманітними датчиками та інформаційними сенсорами; використанням датчиків і пунктів (точок) спостереження на полі бою і поза ним;

– зміною стартових умов ведення військових дій, яке полягає в попередньому впливі на стартові умови війни шляхом закладання в них такої структури, яка завідомо приведе до перемоги над противником; провокуванням поєднання в часі та просторі подій, які покликані вплинути на потенційного супротивника і блокувати його відповідну ініціативу;

– стиснутістю операції, в яких долаються структурні і процедурні розмежування між різними військовими службами, а повний доступ до різнорідної інформації забезпечується навіть на найнижчому рівні бойових одиниць. За рахунок цього підвищується розгортання і застосування бойової сили та забезпечення боєприпасами; відміняється фрагментація процесів (організація, розгортання, використання, забезпечення тощо) та функціональних сфер (операцій, розвідки та логістики); відмінюються структурні розмежування на низових базових групах;

– застосуванням операцій, що ґрунтуються на ефектах (ОБЕ, англ. Effects-based operations), тобто сукупності дій, спрямованих на формування моделі поведінки друзів, нейтральних сил і ворогів у будь-якій ситуації (миру, кризи або війни). При цьому учасникам нічого не нав'язується прямим чином, але при цьому вони виконують те, що потрібно тим, хто вибудовує цю модель управління.

Графічна інтерпретація переваг мережецентричної моделі бойових дій представлена на рис. 7 [38].

Відповідно до концепції МЦВ стверджується, що сучасні конфлікти розгортаються в чотирьох суміжних сферах: фізичній, інформаційній, когнітивній та соціальній. Кожна з них має важливе самостійне значення, але вирішальним у МЦВ є синергетичний (емерджентний) ефект за рахунок цілеспрямованих дій різних факторів цих структур.

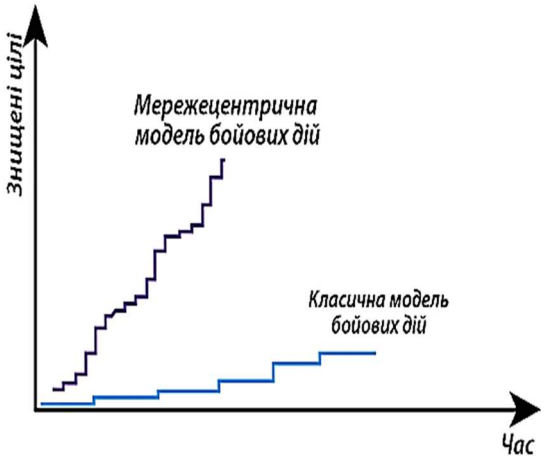


Рис. 7. Переваги мережецентричної моделі бойових дій

Фізична сфера – це традиційна сфера війни, у якій відбувається зіткнення фізичних сил у часі та просторі. Ця сфера містить у собі середовище ведення бойових дій (море, суша, повітря, космічний простір), бойові платформи і фізичні носії комунікаційних мереж. Цей аспект піддається

виміру й раніше слугував основою при визначенні сили ЗС і їх здатності вести бойові дії. В інформаційну епоху цей чинник є не таким важливим, тому слід розглядати фізичний аспект як деякий граничний ефект дії мережевих технологій, основна частина яких знаходиться в інших сферах, але які проєктують на фізичну сферу свої ефекти.

Інформаційна сфера – це сфера, де створюється, обробляється і розподіляється інформація. Ця сфера покриває системи передачі інформації, базові сенсори, моделі обробки інформації тощо. Це переважне середовище епохи мережевих війн, яка відокремилась в самостійну категорію – «інформосферу» – поряд з фізичними середовищами і набуває важливого значення. Інформаційна сфера в епоху мережевих війн пов'язує між собою всі рівні ведення війни та є найбільш пріоритетною. Переваги або недоліки в накопиченні, передачі, обробці й охороні інформації набувають поступово вирішального значення.

Когнітивна сфера – це здатність бійця до розумового сприйняття і переробки зовнішньої інформації. Саме вона є тим простором, де переважно здійснюється ОБЕ. Усі основні війни й битви розгортаються і виграються саме в цій сфері. Саме в когнітивній сфері знаходяться такі явища, як «намір командира», доктрина, тактика, техніка і процедури. МЦВ надають цьому фактору важливе значення, хоча процеси, що здійснюються в цій сфері, виміряти значно складніше, ніж у фізичній сфері. Але їх цінність і ефективність набагато важливіше.

Соціальна сфера являє собою поле взаємодії людей, де переважають історичні, культурні, релігійні цінності, психологічні установки, етнічні особливості. У соціальному просторі розвиваються стосунки між людьми, вибудовуються природні ієрархії в групах – лідери, відомі, тощо, складаються системи групових відношень. Соціальна сфера є контекстом мережевих війн, яку треба брати до уваги найбільш ретельним чином. Війни інформаційної епохи засновані на свідомій інтеграції всіх чотирьох сфер. З них і створюється мережа, яка знаходиться в основі ведення військових дій [38].

Особливостями мережецентричних війн слугують:

– широка можливість використання географічно розподілених військових формувань. Якщо попередньо через різного роду обмеження була необхідність розташування частин і підрозділів тилового забезпечення в безпосередній близькості до місць дислокації своїх військ або до об'єкта оборони, то нова концепція зняла ці обмеження і практично довела свою ефективність в Іраку. Для організації адресного тилового постачання – основи бойового застосування військ у маневровій війні, армія США використовувала розподілену інформаційну систему Army's Movement Tracing System – MTC, яка на основі радіовипромінювальних датчиків, стаціонарних і портативних сканерів, навігаційної супутникової системи GPS, безпровідного доступу і тактичного Internet безперервно відслідковувала положення всіх наземних рухомих об'єктів (танків, бронетранспортерів, бойових машин піхоти (БМП) тощо) на всьому іракському театрі бойових дій. Від екіпажів наземних рухомих об'єктів підрозділи тилу одержували запити на постачання палива, боєприпасів, запасних частин та інших видів забезпечення. Усього в цій системі було задіяне близько 4000 бортових комп'ютерів і 100 серверів, що працювали під операційною системою Windows NT. Система MTC коштувала армії 418 млн дол. США, отриманих компаніями NSI Global inc. і Comtech Mobile Datacom Corp. за постачання необхідного обладнання протягом трьох років;

– наявність високоінтелектуальних ЗС, які використовують високотехнологічне сучасне інформаційно-комунікаційне обладнання, високоточну зброю, інформацію одержану від всеохоплюючого моніторингу бойового простору, які розуміють наміри командування, мають певні знання та навички і забезпечують значно більшу ефективність, на відмінну від ведення автономних, порівняно розрізнених дій. Перед початком війни (2003 р.) над Іраком були розміщені 40 американських супутників. Це дозволило основній ударній силі, що брала участь в операції «Шок і хвилювання» – 5-му армійському

корпусу самостійно відслідковувати до 1000 наземних цілей супротивника протягом години. Командири ескадрилей палубної авіації могли брати участь у плануванні вильотів своїх екіпажів разом із колегами з армійської авіації, користуючись загальною інформаційною системою, чого, наприклад, не було в 1991 р. Більше того, понад 80 % бойових вильотів авіації проводились «наосліп» (відсутність у пам'яті бойових комп'ютерів літаків попередньо визначених цілей). Інформація про цілі надходила в бортові комп'ютери від наземних частин безпосередньо з лінії зіткнення. Для цього американці розгорнули спеціальну систему бойового планування і управління авіацій на театрі військових дій (ТВД) «TBMCS» (Theater Battle Management Core Systems). Крім того, використовувалась нова розподілена інформаційна система бойового управління FBCB2 (Force XXI Battle Command Brigade or Below), яка охоплювала рівень «бригада – батальйон – рота». Усі командири бойових підрозділів і передові артилерійські наводчики для орієнтування на місцевості і передачі бойових донесень мали в своєму розпорядженні штатні кармані комп'ютери (500 МГц) 4 Гбайт (Windows 95|NT) з міцним корпусом;

– наявність доволі ефективних інформаційних комунікацій між об'єктами в бойовому просторі, що дає можливість географічно розподіленим об'єктам виконувати спільні бойові дії, а також динамічно розподіляти відповідальність і весь обсяг роботи, щоб пристосуватись до ситуації. Це більше ніж у 7 разів (порівняно з 1991 р.) збільшило сумарну смугу пропускання (до 3 ГГц) орендованих Пентагоном каналів супутникового зв'язку для передачі інформації.

Враховуючи особливості проведення МЦВ стосовно до можливого театру бойових дій, концепція передбачає чотири основні фази ведення бойових дій.

1. Досягнення інформаційної переваги за допомогою випереджувального знищення (виведення з ладу, придушення) розвідувально-інформаційного забезпечення супротивника (засобів і систем розвідки (сенсорів), мережоутворюючих вузлів, центрів обробки інформації та управління тощо).
2. Завоювання переваги в повітрі шляхом придушення (знищення) системи протиповітряної оборони (ППО) супротивника.
3. Послідовне знищення залишених без управління і інформації засобів ураження супротивника, насамперед ракетних комплексів, авіації, артилерії, бронетехніки.
4. Остаточне придушення або знищення осередків опору супротивника.

Успішне здійснення кожної з фаз операції ґрунтується на значно меншій тривалості бойового циклу «виявлення – впізнання – цілевказівка – ураження» або циклу «спостереження – орієнтування – прийняття рішення – дії» порівняно з супротивником, на більш точних і повних відомостях про угруповання супротивника [39; 40].

Крім безпосередньо бойових дій, мережентрична парадигма може використовуватись у моніторингу озброєння, боротьбі з тероризмом, підтримці операцій по боротьбі з наркобізнесом і контрабандою, операціях по контролю за виконанням санкцій і перехопленню суден у морі, контролі за збереженням закритих зон, забезпеченням свободи проходження суден і прольоту літаків; наданні гуманітарної допомоги, сприянні цивільній владі, захисту національного суверенітету, проведення антиповстанських операцій; операціях з евакуації мирного населення, миротворчих операцій, захисту судноплавства, рятувальних операціях, операціях з демонстрації сили, проведення каральних ударів і рейдів, наданні підтримки повстанцям тощо [41].

Виявивши, які преференції дає американський підхід, у тому ж напрямку потягнулися і інші країни. Зокрема, в НАТО реалізується концепція «Комплексні мережеві можливості» (NATO Network Enabled Capabilities), у Франції – «Інформаційно-центрична війна» (Guerre Infocentre), у Швеції – «Мережева оборона» (Network Based Defense), у ФРН – Управління через мережу, в Австралії – Комплексна мережева війна, в Китаї –

«Система бойового управління, зв'язку, обчислювальної техніки, розвідки, спостереження і вогневого ураження» (Command, Control, Communications, Computers, Intelligence, Surveillance, Recognizance & Kill) (рис. 8).



Рис. 8. Концепції мережецентричних війн та збройних конфліктів, що розробляються США, НАТО та деякими іншими країнами

Ключовим засобом забезпечення обміну інформацією і спільного її використання в НАТО розглядають ініціативу створення «Федеративної мережі місій» (англ. NATO Federated Mission Networking (FMN)). Міграція FMN на тактичний рівень створює умови для ефективного ведення мережецентричних операцій.

Саме в «мережецентризмі» військові зарубіжних країн бачать інноваційний інструмент підвищення бойових можливостей ЗС, чисельність яких піддається постійному скороченню, і цілком об'єктивно розраховують на отримання економічної вигоди.

Під мережецентричними силами розуміють зброю і війська, які здатні реалізувати концепцію МЦВ.

Звичайно, розглядати концепцію МЦВ як панацею для одночасного вирішення всіх проблем у галузі військового управління не варто. Але застосування комплексного підходу, який передбачає передусім координацію зусиль державного та військового керівництва, зміну їхніх поглядів на управління військовими формуваннями, створення уніфікованих АСУ військами та озброєнням, розробку сучасних технічних засобів розвідки та високоточної зброї, а також підготовку всього особового складу до роботи з новітніми інформаційно-комунікаційними системами, дозволить побудувати ЗС, здатні адекватно реагувати на будь-які загрози національній безпеці нашої держави.

Крім того, аналіз військових конфліктів, зокрема операція «Буря в пустелі», свідчить, що одне з'єднання, оснащене сучасними засобами автоматизації управління військами, може успішно протистояти трьом з'єднанням, не оснащеним такими засобами. Стає очевидним, що з урахуванням ситуації на сході нашої держави, де підрозділи ЗС України змушені протистояти противнику, який має перевагу в чисельності й вогневих засобах, використання концепції МЦВ може стати тим інноваційним напрямом розвитку, що дозволить вивести обороноздатність країни на принципово новий рівень.

Створення єдиної інформаційної мережі здатне в кілька разів збільшити потужність ЗС без збільшення їх чисельності. МЦВ дозволяє піднятись на новий рівень управління військами, суттєво зменшуючи час прийняття рішень. Застосування нових інформаційних технологій дозволяє змінити класичне співвідношення сил як сторони, що наступає, так і сторони, що обороняється на протилежне, за умови, що сторона, яка обороняється, не має можливості вести МЦВ.

Висновки відповідно до статті. Сучасний стан автоматизації діяльності органів військового управління (ОВУ) ЗС України не перевищує 10-30 % від потреб. Проведений авторами аналіз, свідчить, що автоматизація процесів повсякденної та бойової діяльності на основі мережецентричних технологій дає можливість підвищити ефективність засто-

сування військ щонайменше на 15-30 % і одночасно скоротити на 50 % час, який витрачають органи управління на оперативне планування і доведення завдань до підлеглих. Наявні комплекси засобів автоматизації та програмно-технічні комплекси не становлять цілісних систем, чинні інформаційно-розрахункові задачі забезпечують лише мінімальний набір функціональності – не більше ніж 12-15 % від загальної кількості елементарних функцій посадових осіб органів військового управління.

Отже, у чинній (де-факто ручній та голосовій) системі управління керівному складу ЗСУ для вироблення та прийняття рішень залишається лише 15-17 % від часу, відведеного на оперативне планування. За цим показником Україна поступається всім країнам блоку НАТО, членом якого вона прагне стати. В свою чергу, ЗС провідних країнах світу широко застосовують геоінформаційні системи військового призначення (ГІС ВП) для моделювання ситуацій, бойових операцій та прийняття рішень, витрачаючи при цьому до 75-80 % часу оперативного планування, що забезпечує більш глибоке та якісне опрацювання задумів, оптимізує заходи бойового та логістичного забезпечення, мінімізує втрати на полі бою.

Тому, на нашу думку, першочерговими завданнями розбудови сучасної української армії повинні стати розробка концепції ГІС ВП, підходів щодо її створення, інтеграція ГІС ВП із технологіями ДЗЗ, розробка моделей інтероперабельності інформаційних систем, що використовуються в ЗС України, розробка алгоритмів кластеризації та моніторингу інформаційного простору, розробка алгоритмів прогнозування для моделювання сценаріїв розвитку бойових дій в умовах невизначеності.

Список використаних джерел

1. Назарчук А. В. Сетевое общество и его философское осмысление. *Вопросы философии*. 2008. № 7. С. 61–75.

2. Сучасні технології автоматизації управління. URL: http://opk.com.ua/сучасні-технології-автоматизації-управління.

3. Буренок В. М., Ляпунов В. М., Мудров В. И. Теория и практика планирования и управления развитием вооружения / под ред. А. М. Московского. Москва : Изд-во «Вооружение. Политика. Конверсия», 2005. 418 с.

4. Макаренко С. И. Информационное противоборство и радиоэлектронная борьба в сетецентрических войнах начала XXI века : монография. Санкт-Петербург : Наукоемкие технологии, 2017. 546 с.

5. Ярош С. П. Завдання дослідження та шляхи створення єдиного інформаційного простору при організації управління військами. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. 2010. № 3(9). С. 34–41.

6. Кингстон-Макклори Э. Дж. Руководство войной. Анализ роли политического руководства и высшего военного командования / пер. с англ. Н. П. Павлова и Е. М. Михайлова. Москва : Издательство иностранной литературы, 1957. 342 с.

7. Опыт применения беспилотной авиации в вооруженном конфликте на Украине. URL: https://general-skokov.livejournal.com/tag/сетецентрическая%20война.

8. Ковалев В., Малинецкий Г., Матвиенко Ю. Концепция «сетецентрической» войны для армии России: «множитель силы» или ментальная ловушка? URL: http://www.inesnet.ru/wp-content/mag_archive/2013_05/ES2013-05-Kovalev_Malinetsky_Matvienko.Pdf.

9. Паршин С. А., Горбачев Ю. Е., Кожанов Ю. А. Современные тенденции развития теории и практики управления в вооруженных силах США. Москва : ЛЕНАНД, 2009. 272 с.

10. Слипченко В. И. Войны нового поколения: дистанционные и бесконтактные. Москва : ОЛМА-ПРЕСС образование, 2004. 380 с.

11. Информационные, специальные, воздушно-десантные и аэромобильные операции армий ведущих зарубежных государств: Информационно-аналитический сборник / А. Н. Сидорин и др. Москва : Воениздат, 2011. 344 с.

12. Требин М. П. Войны XXI века. Москва : АСТ, 2005. 608 с.

13. Барышев А. П. Современная стратегия США и НАТО (в контексте проблем национальной безопасности России). Москва : ОГИ, 2011. 248 с.

14. Карякин В. В. Военная политика и стратегия США в геополитической динамике современного мира : монография. Москва : Граница, 2011. 283 с.

15. Попов И. М. «Сетецентрическая война»: готова ли к ней Россия? URL: http://www.milresource.ru/NCW.html.

16. Alberts D. S., Garstka J. J., Stein F. P. Network Centric Warfare: Developing and Leveraging Information Superiority. 2-nd Edition (Revised). US Department of Defense, C4ISR Cooperative Research Program Publications Series, 2001. 292 p. URL: http://www.dodccrp.org/files/Alberts_NCW.pdf.

17. Макаренко А. В. Введение в сетецентрические информационно-управляющие системы. *Конструктивная кибернетика. Исследования. Разработки. Консалтинг*. URL: http://www.rdcn.ru/estimation/2010/03042010.shtml.

18. Слюсаренко А. В. Досвід ведення бойових дій у локальних війнах кінця XX – початку XXI століть, та його використання у підготовці ЗС України. URL http://ena.lp.edu.ua/bitstream/ntb/30909/1/30.pdf.

19. Пермяков О. Ю., Сбітнєв А. І. Інформаційні технології та сучасна збройна боротьба. Луганськ : Знання, 2008. 204 с.,

20. Василенко О. В. Основні світові тенденції розвитку озброєння та військової техніки для ведення війн у майбутньому. *Наука і оборона*. 2009. № 4. С. 18–22.

21. Куприянов А. А. Сетецентрические военные действия и вопросы интероперабельности автоматизированных систем. *Автоматизация процессов управления.* 2011. № 3(25). С. 83-97. URL: http://apu.npomars.com/images/pdf/25_14.pdf.

22. Зайцев Д. В., Шарий В. І., Добровольський В. Б. Розвиток загальної тактики за досвідом локальних війн і збройних конфліктів сучасності, які велись регулярними військами проти іррегулярних збройних формувань. *Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка*. 2015. Вип. 49. С. 117-124. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpviknu_2015_49_20.

23. Поліщук Л. І., Філімонов С. М. Аналіз деяких систем управління збройними силами країн НАТО та інших держав. *Військовий збірник.* 2009. № 1. С. 85–94.

24. Макаренко С. И. Подавление сетецентрических систем управления радиоэлектронными информационно-техническими воздействиями. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/podavlenie-setetsentricheskih-sistem-upravleniya-radioelektronnymi-informatsionno-tehnicheskimi-vozdeystviyami/viewer.

25. Arquilla J., Ronfeldt D. The Advent of Netwar. Santa Monica, CA: RAND, 1996. P. 47.

26. Сетецентрическая война. Дайджест по материалам открытых изданий и СМИ. Москва : ВАГШ ВС РФ, 2010.

27. Мережево-центричні військові дії: майбутнє української армії. URL: https://tsn.ua/blogi/themes/o_voine/merezhevo-centrichna-viyna-maybutnye-ukrayinskoyi-armiyi-1258350.html.

28. Слюсар В. И. Военная связь стран НАТО: проблемы современных технологий. *Электроника: Наука, Технология, Бизнес*. 2008. № 4. С. 66-71.

29. Трахтенгерц Э. А. Сетецентрические методы компьютерного противодействия катастрофам и рискам. *Управление большими системами*. 2013. Вып. 41. С. 162–248. URL: http://elib.fa.ru/art2017/bv798.pdf/download/bv798.pdf.

30. Паршин С. А., Горбачев Ю. Е., Кожанов Ю. А. Современные тенденции развития теории и практики управления в вооруженных силах США. Москва : ЛЕНАНД, 2009. 272 с.

31. Коли почнеться третя світова війна. URL: http://jak.bono.odessa.ua/articles/koli-pochnetsja-tretja-svitova-vijna-news-nsk.php.

32. Тактика сухопутних військ. URL: http://www.dogswar.ru/forum/viewtopic.php?f=30&t=958&hilit=канчуков&start=80.

33. Ефремов А. Ю., Максимов Д. Ю. Сетецентрическая система управления – что вкладывается в это понятие? *Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения* : Труды III Всероссийской конференции с международным участием (УКИ-2012, Москва). Москва : ИПУ РАН, 2012. С. 158–161.

34. Кузьмин И. Future Combat System – революция или эволюция? URL: http://www.3dnews.ru/editorial/future_combat_system.

35. Информационные, специальные, воздушно-десантные и аэромобильные операции армий ведущих зарубежных государств: Информационно-аналитический сборник / А. Н. Сидорин и др. Москва : Воениздат, 2011. 344 с.

36. Савин Л. В. Сетецентричная и сетевая война. Введение в концепцию. Москва : Евразийское движение, 2011. 130 с.

37. Сащук Г. Інформаційна безпека в системі забезпечення національної безпеки. URL: http://journ.univ.kiev.ua/trk/publikacii/satshuk_publ.php.

38. Глушков В. О. Основи новітньої теорії ведення сучасних війн. *Актуальні проблеми політики.* 2015. Вип. 56. С. 12–21. URL: http://dspace.onua.edu.ua/bitstream/handle/11300/3031/ Глушков%20APP 56.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

39. Пермяков О. Ю., Сбітнєв А. І. Інформаційні технології та сучасна збройна боротьба. Луганськ : Знання, 2008. 204 с.

40. Fadok, David S. John Boyd and John Warden. Airpower's Quest for Strategic Paralysis. *The Paths of Heaven: The Evolution of Airpower Theory*, Maxwell AFB, AL: Air University Press, 1997. 30 April 2008. URL: http://aupress.maxwell.af.mil/saas_Theses/Fadok/fadok.pdf.

41. Революция в военном деле и «армейские операции вне условий войны». URL: https://magazines.gorky.media/oz/2005/5/revolyucziya-v-voennom-dele-i-armejskie-operaczii-vne-uslovij-vojny-oboyudoostroe-oruzhie.html.

References

1. Nazarchuk, A. V. (2008). Setevoe obschestvo i ego filosofskoe osmyislenie [Network society and its philosophical understanding]. *Voprosyi filosofii – Problems of philosophy,* 7, pp. 61–75.

2. *Suchasni tekhnolohii avtomatyzatsii upravlinnia [Modern technologies of control automation]*. (n.d.). http://opk.com.ua/suchasni-tekhnolohii-avtomatyzatsii-upravlinnia/.

3. Burenok, V. M., Lyapunov, V. M., Mudrov, V. I., Moskovskyi, A. M. (ed.). (2005). Teoriia i praktika planirovaniia upravleniia razvitiem vooruzheniia *[Theory and practice of planning and management of weapondevelopment]*. Izd-vo «Vooruzhenie. Politika. Konversiya».

4. Makarenko, S. I. (2017). *Informatsionnoe protivoborstvo i radioelektronnaya borba v setetsentricheskih voynah nachala XXI veka [Information confrontation and electronic warfare in network-centric wars at the beginning of the XXI century].* Naukoemkie tehnologii.

5. Iarosh, S. P. (2010). Zavdannia doslidzhennia ta shliakhy stvorennia yedynoho informatsiinoho prostoru pry orhanizatsii upravlinnia viiskamy [Research tasks and ways to create a uniform information space at the organization of management of armies]. *Suchasni informatsiini tekhnolohii u sferi bezpeky ta oborony – Modern information technologies in the sphere of security and defense*, 3(9), pp. 34–41.

6. Kingston-Makklori, E. Dzh. (1957). *Rukovodstvo voynoy. Analiz roli politicheskogo rukovodstva i vyisshego voennogo komandovaniya [War leadership. Analysis of the role of political leadership and the highest military command]*. (N. P. Pavlova i E. M. Mihaylova, Trans.). Izdatelstvo inostrannoy literaturyi.

7. Opyit primeneniya bespilotnoy aviatsii v vooruzhennom konflikte na Ukraine [Experience in the use of unmanned aircraft in the armed conflict in Ukraine]. https://general-skokov.livejournal.com/tag/setetsentricheskaya voyna.

8. Kovalev, V., Malinetskiy, G., Matvienko, Yu. (n.d.). Kontseptsiya «setetsentricheskoy» voynyi dlya armii Rossii: «mnozhitel silyi» ili mentalnaya lovushka? [Concept of "network-centric" war for the Russian army: "force multiplier" or a mental trap?]. http://www.inesnet.ru/wp-content/mag archive/2013 05/ES2013-05-Kovalev Malinetsky Matvienko.Pdf.

9. Parshin, S. A., Gorbachev, Yu. E., Kozhanov, Yu. A. (2009). *Sovremennyie tendentsii razvitiya teorii i praktiki upravleniya v vooruzhennyih silah SShA [Modern trends in the development of the theory and practice of management in the US armed forces]*. LENAND.

10. Slipchenko, V. I. (2004). *Voiny novogo pokoleniia: distantsionnye i beskontaktnye [New generation wars: remote and non-contact].* OLMA-PRESS obrazovanie.

11. Sidorin, A. N., Ryabchenko, I. A., … Gerasimov, V. P. (2011). *Informatsionnye, spetsialnye, vozdushno-desantnye i aeromobilnye operatsii armii veduschikh zarubezhnykh gosudarstv: Informatsionno-analiticheskii sbornik [Information, special, airborne and airmobile operations in the armies of the leading foreign states: Information and analytical collection]*. Voenizdat.

12. Trebin, M. P. (2005). *Voynyi XXI veka [Wars of the XXI century]*. AST.

13. Baryishev, A. P. (2011). *Sovremennaia strategiia SShA i NATO (v kontekste problem natsionalnoy bezopasnosti Rossii) [Modern strategy of the USA and NATO (in the context of Russian national security problems)]*. OGI.

14. Karyakin, V. V. (2011). *Voennaia politika i strategiia SShA v geopoliticheskoi dinamike sovremennogo mira [Military policy and strategy of the United States in the geopolitical dynamics of the modern world].* Granitsa.

15. Popov, I. M. (n.d.). «Setetsentricheskaya voyna»: gotova li k ney Rossiya? ["Network-centric war": is Russia ready for it?]. http://www.milresource.ru/NCW.html.

16. Alberts, D. S., Garstka, J. J., Stein, F. P. (2001). *Network Centric Warfare: Developing and Leveraging Information Superiority* (2nd edition (revised)). US Department of Defense, C4ISR Cooperative Research Program Publications Series. Retrieved 19.12.2019 from http://www.dodccrp.org/files/Alberts_NCW.pdf.

17. Makarenko, A. V. (n.d.). Vvedenie v setetsentricheskie informatsionno-upravliaiuschie sistemyi [Introduction to network-centric information and control systems]. In *Konstruktivnaia kibernetika. Issledovaniia. Razrabotki. Konsalting – Constructive cybernetics. Research. Developments. Consulting.* http://www.rdcn.ru/estimation/2010/03042010.shtml.

18. Sliusarenko, A. V. (n.d.). *Dosvid vedennia boiovykh dii u lokalnykh viinakh kintsia XX – pochatku XXI stolit, ta yoho vykorystannia u pidhotovtsi ZS Ukrainy [Experience of warfare in local wars of the late XX - early XXI centuries, and its use in the training of the Armed Forces of Ukraine].* http://ena.lp.edu.ua/bitstream/ntb/30909/1/30.pdf.

19. Permiakov, O. Iu., Sbitniev, A. I. (2008). *Informatsiini tekhnolohii ta suchasna zbroina borotba [Information technology and modern warfare].* Znannia.

20. Vasylenko, O. V. (2009). Osnovni svitovi tendentsii rozvytku ozbroiennia ta viiskovoi tekhniky dlia vedennia viin u maibutnomu [The main world trends in the development of weapons and military equipment for future wars]. *Nauka i oborona – Science and defense,* 4, pp. 18–22.

21. Kupriyanov, A. A. (2011). Setetsentricheskie voennyie deystviya i voprosyi inteoprabelnosti avtomatizirovannyih sistem [Network-centric military actions and issues of interoperability of automated systems]. *Avtomatizatsiia protsessov upravleniia – Automation of control processes,* 3(25), pp. 83-97. http://apu.npomars.com/images/pdf/25_14.pdf.

22. Zaitsev, D. V., Sharyi, V. I., Dobrvolskyi, V. B. (2015). Rozvytok zahalnoi taktyky za dosvidom lokalnykh viin i zbroinykh konfliktiv suchasnosti, yaki velys rehuliarnymy viiskamy proty irrehuliarnykh zbroinykh formuvan [Development of general tactics based on the experience of local wars and armed conflicts of today, which were conducted by regular troops against irregular armed groups]. *Zbirnyk naukovykh prats Viiskovoho instytutu Kyivskoho natsionalnoho universytetu imeni Tarasa Shevchenka – Collection of scientific works of the Military Institute of the Taras Shevchenko National University of Kyiv*, 49, pp. 117–124. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpviknu_2015_49_20.

23. Polishchuk, L. I., Filimonov, S. M. (2009). Analiz deiakykh system upravlinnia zbroinymy sylamy krain NATO ta inshykh [Analysis of some management systems of the armed forces of NATO and other countries]. *Viiskovyi zbirnyk – Military collection*, 1, pp. 85–94.

24. Makarenko, S. I. (n.d.). *Podavlenie setetsentricheskikh sistem upravleniia radioelektronnymi informatsionno-tehnicheskimi vozdeistviiami [Suppression of network-centric control systems for electronic information and technical effects].* URL: https://cyberleninka.ru/article/n/podavlenie-setetsentricheskih-sistem-upravleniya-radioelektronnymi-informatsionno-tehnicheskimi-vozdeystviyami/viewer.

25. Arquilla, J., Ronfeldt D. (1996). *The Advent of Netwar*. Santa Monica, CA: RAND.

26. *Setetsentricheskaia voina. Daidzhest po materialam otkryityih izdanii i SMI [Network-centric warfare. Digest based on materials from open publications and media].* (2010). VAGSh VS RF.

27. *Merezhevo-tsentrychni viiskovi dii: maibutnie ukrainskoi armii [Network-centric military action: the future of the Ukrainian army]* (n.d.). https://tsn.ua/blogi/themes/o_voine/merezhevo-centrichna-viyna-maybutnye-ukrayinskoyi-armiyi-1258350.html.

28. Slyusar, V. I. (2008). Voennaya svyaz stran NATO: problemyi sovremennyih tehnologiy [Military communications of NATO countries: problems of modern technologies]. *Elektronika: Nauka, Tehnologiya, Biznes – Electronics: Science, Technology, Business,* 4, pp. 66–71.

29. Trahtengerts, E. A. (2013). Setetsentricheskie metodyi kompyuternogo protivodeystviya katastrofam i riskam [Network-centric methods of computer counteraction to disasters and risks]. *Upravlenie bolshimi sistemami – Large-Scale Systems Control,* 41, pp. 162–248. http://elib.fa.ru/art2017/bv798.pdf/download/bv798.pdf.

30. Parshin, S. A., Gorbachev, Yu. E., Kozhanov, Yu. A. (2009). *Sovremennye tendentsii razvitiia teorii i praktiki upravleniia v vooruzhennykh silah SShA [Modern trends in the development of theory and practice of management in the US armed forces]*. LENAND.

31. *Koly pochnetsia tretia svitova viina [When the Third World War begins].* (n.d.). http://jak.bono.odessa.ua/articles/koli-pochnetsja-tretja-svitova-vijna-news-nsk.php.

32. *Taktyka sukhoputnykh viisk [Tactics of Ground Forces]*. (n.d.). http://www.dogswar.ru/forum/viewtopic.php?f=30&t=958&hilit=kanchukov&start=80.

33. Efremov, A. Yu., Maksimov, D. Yu. (2012). Setetsentricheskaya sistema upravleniya – chto vkladyivaetsya v eto ponyatie? [Network-centric control system - what is included in this concept?]. *Tehnicheskie i programmnyie sredstva sistem upravleniya, kontrolya i izmereniya: Trudyi III Vserossiyskoy konferentsii s mezhdunarodnyim uchastiem – Hardware and software for control, monitoring and measurement systems: Proceedings of the 3rd All-Russian conference with international participation* (UKI-2012, Moscow) (pp. 158–161). IPU RAN.

34. Kuzmin, I. (n.d.). Future Combat System – revolyutsiia ili evoliutsiia? [Future Combat System – revolution or evolution?]. http://www.3dnews.ru/editorial/future_combat_system.

35. Sidorin, A. N., Ryabchenko, I. A., … Gerasimov, V. P. (2011). *Informatsionnye, spetsialnye, vozdushno-desantnye i aeromobilnye operatsii armii veduschikh zarubezhnykh gosudarstv: Informatsionno-analiticheskiy sbornik [Information, special, airborne and airmobile operations of the armies of leading foreign countries: Information and analytical collection].* Voenizdat.

36. Savin, L. V. (2011). *Setetsentrichnaia i setevaia voina. Vvedenie v kontseptsiiu [Network-centric and network warfare. Introduction to the concept].* Evraziyskoe dvizhenie.

37. Sashchuk, H. (n.d.). *Informatsiina bezpeka v systemi zabezpechennia natsionalnoi bezpeky [Information security in the system of national security].* http://journ.univ.kiev.ua/trk/publikacii/satshuk_publ.php.

38. Hlushkov, V. O. (2015). Osnovy novitnoi teorii vedennia suchasnykh viin [Fundamentals of the latest theory of modern wars]. *Aktualni problemy polityky – Actual Problems of Politics,* 56, pp. 12-21. http://dspace.onua.edu.ua/bitstream/handle/11300/3031/Hlushkov%20APP_56.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

39. Permiakov, O. Iu., Sbitniev, A. I. (2008). *Informatsiini tekhnolohii ta suchasna zbroina borotba [Information technology and modern armed struggle].* Znannia.

40. Fadok, David S. John Boyd and John Warden (1997). Airpowers Quest for Strategic Paralysis. *The Paths of Heaven: The Evolution of Airpower Theory, Maxwell AFB, AL*: Air University Press, 30 April 2008. http://aupress.maxwell.af.mil/saas_Theses/Fadok/fadok. pdf.

Revoliutsiia v vennom dele i «armeiskie operatsii vne uslovii voiny» [Revolution in military affairs and “army operations outside the conditions of war”]. (n.d.). https://magazines.gorky.media/oz/2005/5/revolyucziya-v-voennom-dele-i-armejskie-operaczii-vne-uslovij-vojny-oboyudoostroe-oruzhie.html.*UDC 316.259+355.01*

UDC 316.259+355.01

Vitalii Zatserkovnyi, Pavlo Savkov, Igor Pampukha, Iryna Syniavska

ASSESSMENT OF THE ADVANTAGES OF NETWORK-CENTRISM AND NETWORK-CENTRIC TECHNOLOGIES FOR DEVELOPMENT OF THE ARMED FORCES OF UKRAINE

Urgency of the research. *Given the changes of the nature of modern wars and ways to achieve informational advantage over the enemy, the study of network-centric technologies is extremely relevant. Increasing the maneuverability of units, their ability to perform combat missions on the basis of continuous information support, makes it possible to gain a significant advantage over the enemy, to prevent and neutralize real and potential threats to national security.*

Target setting. *The current level of automation, informatization and control system of the Armed Forces of Ukraine on the set of values of the characteristics of its main components does not meet modern requirements.*

Actual scientific researches and issues analysis. *The problems of external information influences and information aspects of ensuring the national security of the state, the conceptual problems of war and peace and the problem of network-centric wars are considered.*

Uninvestigated parts of general matters defining. *The main problem in applying the principles of network-centrism in the organization of modern combat is insufficiently effective and unadapted to modern requirements information systems.*

The research objective. *The priority is to form an effective information system based on network-centric technologies, which will reduce the time for decision-making, and predict possible scenarios and prevent possible consequences.*

The statement of basic materials. *Advances in information and communication technologies (ICTs) have given rise to new models of high-precision weapons, modern intelligence, and automatic and automated control systems (ACS) for troops and weapons. Computer technology made it possible to control weapons at a distance of several thousand kilometers, to form high-precision point strikes, to correct the actions of military units, to carry out actions of military formations in several directions to destroy enemy objects or capture its territory, to achieve results in a short period time, etc. The need to make the most of all available reconnaissance and combat platforms led to a shift from a platform-centric model of troop and arms control, with the main emphasis on the number of weapons and military equipment, to a network-centric one.*

Conclusions. *The role of network-centric wars and their influence on the development of the Armed Forces of the economically advanced countries is determined. The use of network-centric approaches has led to the emergence of many new non-traditional forms and methods of armed struggle, such as "special operation", "three-dimensional air-ground form of attack on the enemy", "long-range fire", etc., during which ships and submarines, aircraft, space aircraft, unmanned aerial vehicles (UAVs), tanks, field radios and laptops, etc. shared information through common interfaces, standards and protocols. The components of high efficiency of network-centric wars are determined.*

Keywords: *information advantage; single information space; network centrism; network-centric control system; network-centric war.*

Fig.: 8. References: 42.

Зацерковний Віталій Іванович – доктор технічних наук, професор, завідуючий кафедри геоінформатики, Навчально-науковий інститут «Інститут геології» Київського національного університету імені Тараса Шевченка (вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна).
Zatserkovnyi Vitalii – Doctor of Technical Sciences, Professor, Chair of the Department of Geoinformatics, Institute of Geology of Taras Shevchenko National University of Kyiv (90 Vasylkivska Str., 03022 Kyiv, Ukraine).
E-mail: vitalii.zatserkovnyi@gmail.com
SCOPUS Author ID: 57200165109
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2346-9496
ResearcheriD: AAE-6191-2019

Савков Павло Анатолійович – кандидат технічних наук, доцент, начальник кафедр геоінформаційних систем та технологій, Військовий інститут Київського національного університету імені Траса Шевченка (вул. Ломоносова,81, м. Київ, 03189, Україна).
Savkov Pavlo – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Chair of the Department of Geoinformation System and Tachnologies, Military Institute of Taras Shevchenko National University of Kyiv (81 Lomonosova Str., 03189 Kyiv, Ukraine).
E-mail: savkovpa@gmail.com
SCOPUS Author ID: 57210749931
ORCID: https:// orcid.org/0000-00020127-0610

Пампуха Ігор Володимирович – кандидат технічних наук, доцент, начальник науково-дослідного центру, Військовий інститут Київського національного університету імені Траса Шевченка (вул. Ломоносова,81, м.Київ, 03189, Україна).
Pampukha Igor – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Chair of the Reaseacher Centre, Military Institute of Taras Shevchenko National University of Kyiv (81 Lomonosova Str., 03189 Kyiv, Ukraine).
E-mail: pamp@ukr.net
SCOPUS Author ID: 57195922711
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-4807-3984

Синявська Ірина Костянтинівна – ад'юнкт науково-організаційного відділення, Військовий інститут Київського національного університету імені Траса Шевченка (вул. Ломоносова, 81, м. Київ, 03189, Україна).
Syniavska Iryna – PhD Student, Military Institute of Taras Shevchenko National University of Kyiv (81 Lomonosova Str., 03189 Kyiv, Ukraine).
E-mail: irinashatkovska@gmail.com
SCOPUS Author ID: 57218568662
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2645-994X

Зацерковний В., Савков П., Пампуха І., Синявська І. Оцінка переваг мережецентризму та мережецентричних технологій для розбудови Збройних Сил України. *Технічні науки та технології.* 2020. № 3 (21). С. 163-184.

УДК 519.872.4
DOI: 10.25140/2411-5363-2020-3(21)-185-197

Світлана Корнієнко, Ігор Корнієнко, Володимир Дмитрієв,
Анатолій Павленко, Олег Скиба

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ КОРЕЛЯЦІЙНОГО АНАЛІЗУ ДО ПРОБЛЕМИ ПРОГНОЗУВАННЯ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ ВИПРОБУВАНЬ ОЗБРОЄННЯ ТА ВІЙСЬКОВОЇ ТЕХНІКИ

Актуальність теми дослідження. *Проведення випробувань озброєння та військової техніки є важливим та відповідальним державним завданням. Процес випробувань має регламентні обмеження в часі, чим забезпечується своєчасне виконання державних програм із прийняття на озброєння новітніх зразків. Нерідко під час випробувань відбуваються часові відхилення і затримки від запланованих термінів, що ставить під загрозу успішність виконання державного завдання. Тому прогнозування реального часу проведення випробувань є актуальним завданням.*

Постановка проблеми. *Ефективність функціонування військової випробувальної установи визначається чітким та налагодженим процесом проведення масових випробувань новітніх зразків озброєння та військової техніки. Зриви випробувань та часові відхилення від плану, які мають певну стохастичну природу, здатні знизити ефективність всього процесу масових випробувань. Звідси виникає проблема прогнозування реального часу проведення випробувань окремого зразка озброєння та військової техніки.*

Аналіз останніх досліджень і публікацій. *На сьогодні існують багато фундаментальних і прикладних праць із питань формування прогнозів як природних явищ, так і у різних сферах діяльності людини. Останнім часом публікується чимало наукових робіт, присвячених проблемам підвищення ефективності випробувань, зокрема за допомогою автоматизації.*

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. *Проблемою є визначення величини та характеру впливу зовнішніх і внутрішніх чинників на реальний час проведення випробувань окремих зразків.*

Постановка завдання. *Для нормалізації планової діяльності випробувальної установи необхідно визначити спосіб, за допомогою якого на основі наявного статистичного матеріалу про перебіг випробувань дозволить чисельно визначати величину та характер впливу зовнішніх і внутрішніх чинників на час проведення випробувань та отримувати апріорну оцінку можливого відхилення часу випробувань конкретного зразку озброєння та військової техніки.*

Виклад основного матеріалу. *Розглянуто підхід до одержання кількісних значень впливу чинників зсуву часу на процес випробувань. Обґрунтовано та додано до загального виразу розрахунку реального часу випробувань поправочний коефіцієнт виду випробувань. Розглянуто та підготовлено до алгоритмування математичний апарат кореляційного аналізу для дослідження ступеню та характеру впливу внутрішніх та зовнішніх чинників на реальний час випробувань конкретного зразка озброєння та військової техніки. Зроблені зауваження та ремарки із застосування кореляційного аналізу до прогнозування реального часу випробувань.*

Висновки відповідно до статті. *Застосування кореляційного аналізу для прогнозування реального часу випробувань дозволить встановити об'єктивні показники відхилення часу випробування під дією зовнішніх та внутрішніх чинників, що супроводжують процес випробувань. Використання прогнозів у складі автоматизованої підсистеми планування та управління якістю випробувань дозволить нормалізувати перебіг процесу випробувань та мінімізувати негативний прояв зовнішніх та внутрішніх чинників.*

Ключові слова: *автоматизація; випробування, прогнозування, час, озброєння та військова техніка.*
Табл.: 6. Рис.: 1. Бібл.: 32.

Постановка проблеми. Основне функціональне призначення випробувальної установи полягає у проведенні різного роду випробувань і досліджень зразків, а також оцінки результатів випробувань. З першого погляду така діяльність повинна мати чіткий плановий характер, проте на практиці, плановий процес проведення випробувань уразливий до множини внутрішніх та зовнішніх стохастичних впливів. Критичним такий вплив є при достатньо великій інтенсивності та щільності вхідного потоку зразків для випробувань. Тоді будь-яка затримка у випробуванні однозначно відіб'ється на випробуванні інших, наступних зразків (що може статися через елементарний можливий брак фахівців-випробувальників, з яких комплектуються випробувальні бригади). При цьому утримання у штаті установи надмірної кількості фахівців для оперативного реагування на подібні форс-мажорні ситуації може виявитись надто затратним. З іншого боку, зменшення часу випробувань, наприклад через зняття зразку з випробувань, може призвести до певного простою випробувальної бригади, а отже, і зниження ефективності функціонування випробувальної установи. Звідси виникає проблема врахування проявів можливих стохастичних чинників впливу на процес випробування і, відповідно, прогнозування реального часу проведення випробувань.

© Корнієнко С. П., Корнієнко І. В., Дмитрієв В. А., Павленко А. Г., Скиба О. В., 2020

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Процеси планування та проведення випробувань регламентуються чисельними законодавчими й нормативними актами, відомчими наказами та методичними рекомендаціями, наприклад [1-4]. На сьогодні одержала розвиток величезна кількість методів прогнозування, що застосовуються як до різних практичних сфер життєдіяльності, таких як економіка [5, 6], маркетинг [7], виробництво [8], соціологія [9; 10], політика [11], демографія [12; 13], метеорологія [14; 15] тощо; так і окремих наукових напрямів, таких як теорія надійності технічних систем [16; 17] і, навпаки, теорія скритності [18], прогнозування поведінки різноманітних систем, явищ і процесів у техніці [19], системах зв'язку [20], комп'ютерних технологіях [21], енергетиці [22], зокрема й у військовій справі [23]. Усі ці методи умовно можна згрупувати на евристичні (експертні), натурні (модельне, масштабне моделювання), екстраполяційні (динаміка середніх, найменших квадратів) та математичні (статистичне, аналітичне, імітаційне та інше моделювання) [24]. Безумовно, кожен метод прогнозування має власні переваги та недоліки і відокремлюється з-поміж інших цільовим призначенням, складністю, точністю і надійністю одержаних прогнозних оцінок.

Для нашого випадку проблема прогнозування формулюється в ракурсі невизначеності впливу зовнішніх та внутрішніх чинників на хід процесу випробування. При цьому невідомими на цей момент є як можливий перелік чинників впливу, так і їхня величина та характер прояву, а також їхня комплексна дія. Прогнозування можливих часових відхилень ходу випробувань дозволило б нівелювати негативну часову девіацію процесу випробувань, яка викликана проявами чинників зсуву. Підхід до прогнозування реального часу випробувань запропоновано авторами у [25], в основі якого покладено формування системи поправочних коефіцієнтів, обчислених на основі набору статистичних даних. Вихідними даними для задачі прогнозування є набір статистичних даних результатів випробувань за три роки, генеральна сукупність яких володіє властивістю спроможності [26], що звужує вибір методів аналізу до статистичного моделювання.

Аналіз генеральної сукупності статистичних даних дозволить сформувати наближений перелік чинників впливу на хід випробування та оцінку характеру їх впливу. Проте застосувати напряму екстраполяційні методи прогнозування буде неможливо через унікальність зразків для випробування та можливу комплексність впливу чинників зсуву. У [25] запропоновано використання апарату теорії ймовірностей та кореляційного аналізу для врахування впливу стохастичних процесів. Вибір саме цього методу аналізу ґрунтується на неявних ознаках впливу чинників на процес випробувань та добру розвиненість цих методів аналізу [26; 27]. До того ж застосування цього методу вже було апробовано авторами у [28], де одержані добрі практичні результати.

Впровадження такого методу прогнозування у підсистему автоматизації планування та управління випробуваннями [29], дозволило б суттєво підвищити якість процесу випробувань, зокрема, і діяльність випробувальної установи.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Запропонований авторами підхід до прогнозування реального часу проведення випробувань озброєння та військової техніки (ОВТ) [25] передбачає використання вагових коефіцієнтів для корегування нормативного часу виконання випробувань певного зразка. Однак визначення величини та характеру впливу (додатний чи від'ємний) є нині проблемою через можливу комплексність впливу різних чинників зсуву, стохастичність умов проведення досліджень та унікальність (несерійність) зразків для випробування.

Мета статті. Сформувати спосіб, який на основі наявного статистичного матеріалу дозволить чисельно визначати величину та характер впливу зовнішніх і внутрішніх чинників на час проведення випробувань та отримати апріорну оцінку можливого відхилення часу випробувань конкретного зразку ОВТ.

Виклад основного матеріалу. Загальному розгляду підлягає випробувальний інститут, який проводить випробування нових зразків ОВТ. Для опису й аналізу процесів, що супроводжують процес випробування у [30] запропоновано використання системи масового обслуговування (СМО), графічне представлення якої наведено на рис. 1.

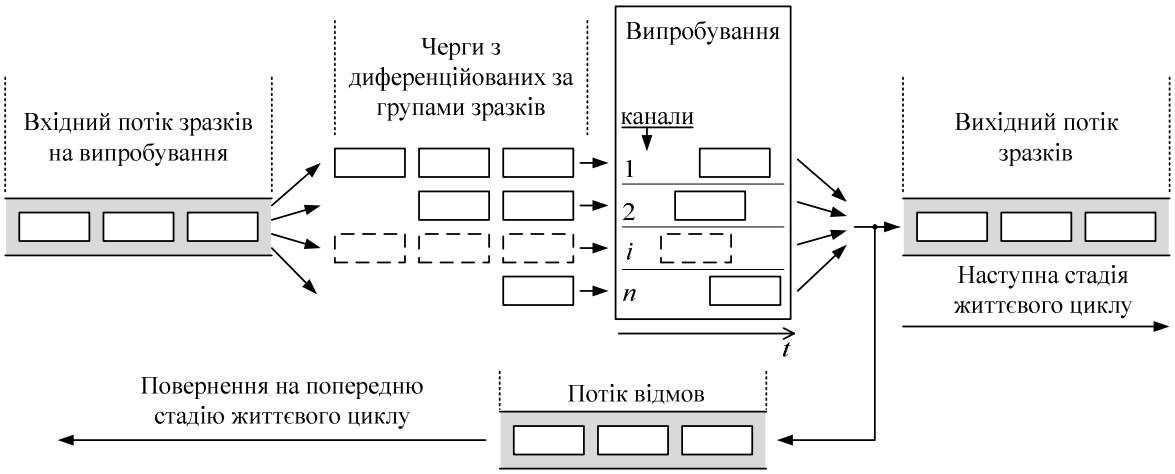


Рис. 1. Система масового обслуговування випробувань

Аналіз звітного матеріалу з результатами випробувань виявив факти відхилення фактичного терміну випробувань від запланованого, що пов'язано з впливом різних чинників внутрішнього (допідготовка випробувальної бригади, потреба у специфічних методиках випробувань, недосконалість лабораторно-вимірювальної бази тощо) та зовнішнього характеру (погодні умови, пора року, непідготовленість зразку або усунення виявлених недоліків у процесі випробування). Для нівелювання такого негативного явища авторами запропоновано підхід до прогнозування реального часу випробувань, який ґрунтується на використанні виразу [25]:

$$t^{*G} = \omega^{G} M\left[t_{в}\right], \tag{1}$$

де t^{*G} – прогнозований час проведення випробувань, ω^{G} – згортка вагових коефіцієнтів, що враховують вплив чинників зсуву на хід випробування зразка; $M[t_{в}]$ – математичне сподівання часу випробування середньостатистичного зразка.

На цьому етапі опустимо питання різнорідності зразків ОВТ, видів випробувань, різновидів чинників впливу, і формалізуємо їх до понять множин: $Z=\{z_1, z_2, \ldots z_n\}$ – множина класів зразків ОВТ; $S=\{s_1, s_2, \ldots s_x\}$ – множина видів випробувань; $V\in\{v_1, v_2, \ldots v_m\}$ – множина чинників зсуву часу.

Як вже зазначалося у [25], неоднорідні зразки (а точніше групи, або класи зразків) при випробуваннях можуть по-різному реагувати на прояви чинників зсуву часу – одна група зразків (наприклад, безпілотні літальні апарати) при випробуваннях мають критичну залежність від погодних умов, але інша група (наприклад, кабелі зв'язку) майже нечутливі до такого чинника. Відповідно, згортка вагових коефіцієнтів ω_i^G по i-тій групі зразків представляється згорткою по z_i стовпчику матриці (назвемо її матрицею чинників зсуву) виду:

$$\begin{array}{c|cccc} & z_1 & z_2 & \ldots & z_n \\ \hline v_1 & \omega_{11} & \omega_{12} & \ldots & \omega_{1n} \\ v_2 & \omega_{21} & \omega_{22} & \ldots & \omega_{2n} \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ v_m & \omega_{m1} & \omega_{m2} & \ldots & \omega_{mn} \end{array}, \tag{2}$$

де ω_{ji} – вплив j-го чинника на i-ту групу зразків.

Вираз (1) виражає вплив чинників зсуву на реальний час випробувань. Проте вид випробувань (визначальні відомчі, державні тощо) суттєво впливає на обсяг випробувань, а отже, і на час виконання програми випробування. З огляду на це можна було б очікувати, що матриця (2) має звестись до тривимірного вигляду з перебором по всіх видах випробувань множини $\{S\}$, однак, очевидно, що вплив будь-якого виду випробувань S_k на загальний час виконання програми випробувань є лінійним і не залежить від комбінації елементів множин $\{Z\}$ і $\{V\}$, але залежить тільки від групи ОВТ Z_k, а саме від обсягу випробувань конкретного виду ОВТ. Тобто для кожної групи ОВТ має бути поправочний коефіцієнт виду випробувань:

	z_1	z_2	...	z_n
s_1	s_{11}	s_{12}	...	s_{1n}
s_2	s_{21}	s_{22}	...	s_{2n} .
...	...	...	...	...
s_x	s_{x1}	s_{x2}	...	s_{xn}

(3)

З цих міркувань вираз (1) набуде вигляду:

$$t^{*G} = \omega^G s_{ki} M\left[t_в\right], \tag{4}$$

де S_{ki} – коефіцієнт, що визначає поправку тривалості випробувань k-го виду для i-ї групи ОВТ.

Розглянемо можливість формування матриці чинників зсуву (2). Коефіцієнти зсуву ω_{ji} мають об'єктивно відображати ступінь впливу чинників зсуву на час випробування. Очевидно, що як прояв чинників зсуву, так і результат їхнього впливу у вигляді збільшення або зменшення часу випробувань є випадковими величинами. Тобто в простішому представленні, маємо систему двох випадкових величин «прояв чинника впливу (x)» – «час випробувань (y)», для яких необхідно встановити кореляційну залежність виду $x \rightarrow y$. Визначення такої залежності можливе на основі результатів аналізу масиву статистичних даних про результати випробувань.

Відповідно до принципів кореляційного аналізу [31] визначимо порядок встановлення кореляційних залежностей системи двох випадкових величин v_i і $t_в^i$. На першому етапі необхідно сформувати статистичний ряд розподілу випадкової величини $t_в^i$ для статистичної сукупності даних з n випробувань: $i = 1...n$; $t_в^i \le t_в^{i+1}$.

1	2	…	i	$i+1$	…	n
$t_в^1$	$t_в^2$	...	$t_в^i$	$t_в^{i+1}$	...	$t_в^n$

Для статистичного ряду $t_в^i$ необхідно обрати оптимальну систему класифікації (групування) проведених випробувань. Обрана система повинна якнайкращим чином відокремлювати групу випробувань (формувати кластер і окреслювати особливості класу). Тут можна користуватися різними методами: або розділювальні, або агломераційні. Найбільш поширеними автоматизованими методами розбивки статистичного ряду є методи рівних інтервалів, природної розбивки, квантилів та середньоквадратичного відхилення. Для виділення подібності або розбіжності статистичного показника можна використовувати міри однорідності об'єктів, такі як: евклідова відстань (ступенева евклідова відстань), відстань Чебишева, Мангеттенська відстань, відстань Мінковського тощо [32].

Для визначення ступені подібності статистичного показника (у нашому випадку це $t_в$), можна скористатися евклідовою відстанню виду $s_{t_в}^{ij} = \sqrt{\left(t_в^i - t_в^j\right)^2}$. У випадку спосте-

реження аномально великих значень $s_{t_в}^{ij}$ застосування евклідової відстані не буде ефективним. Тут доцільно скористатися ступеневою евклідовою відстанню $s_{t_в}^{ij} = \sqrt[p]{\left(t_в^i - t_в^j\right)^l}$, в якій варіюванням значень p і l прогресивно збільшувати або зменшувати вагу аномальних показників, досягаючи статистично-рівномірного інтервального ряду евклідової відстані щодо мінімального значення статистичного показника.

Сформований інтервальний ряд розбивається на певну кількість інтервалів, де інтервал статистичного показника обчислюється відповідно обраної ширини інтервального ряду евклідової відстані. Наприклад, при розбивці за схемою рівних інтервалів ширина інтервалу становитиме:

$$\Delta h = \frac{t_в^1 - t_в^n}{b}, \tag{5}$$

де b – кількість інтервалів. Параметри інтервального ряду матимуть вигляд табл. 1.

Таблиця 1

Параметри інтервального ряду «Час випробування»

Параметр	**Кількість інтервалів**	**Нижня межа інтервалу, $h_□$**	**Верхня межа інтервалу, h^***	**Ширина інтервалу**
Час випробування	b	$s_{t_в \min}^{ij}$	$s_{t_в \max}^{ij}$	Δh

Надалі здійснюється групування випробувань по класах відповідно до встановленої ширини інтервального ряду, кожне з яких характеризується проявами чинників зсуву часу (табл. 2).

Таблиця 2

Згруповані показники випробувань та характеристики чинників зсуву

№ класу b	Інтервал Δh	Умовний номер випробування	Час випробування $t_в$		Прояви чинника v_1		Прояви чинника …		Прояви чинника v_m	
			абс.	відн.	абс.	відн.	абс.	відн.	абс.	відн.
1	$t_в^1 \ldots t_в^i$	1	…	…	…	…	…	…	…	…
…		…	…	…	…	…	…	…	…	…
b	$t_в^j \ldots t_в^n$	n	…	…	…	…	…	…	…	…

Результатом групування випробувань є сума показників проявів чинників по групах, які будуть далі нормуватися за кількістю випробувань у класі й визначатимуть середньогрупові показники проявів чинників зсуву по інтервалах.

У подальшому необхідно утворити серію комбінаційних угрупувань інтервальних рядів «*Час випробування*» – «*Прояв і-го чинника зсуву*». Для цього, на основі абсолютних значень проявів чинників зсуву з табл. 2, необхідно утворити m варіаційних рядів (за кількістю чинників зсуву). Розбивка сформованих варіаційних рядів чинників зсуву на інтервали виконується аналогічно до розбивки варіаційного ряду часу випробувань, використовуючи один із наведених методів (попередньо ми користувалися методом рівних інтервалів (5)) (табл. 3).

Таблиця 3

Параметри інтервального ряду і-го чинника зсуву

Параметр	**Кількість інтервалів**	**Нижня межа інтервалу, $h_□$**	**Верхня межа інтервалу, h^***	**Ширина інтервалу**
Чинник зсуву v_i	b	$v_{i\min}$	$v_{i\max}$	Δh

На основі сформованих інтервальних рядів здійснюється попарне групування інтервальних рядів «*Час випробування*» – «*Прояв і-го чинника зсуву*», результат яких утворює кореляційні таблиці, приклад якої наведено в табл. 4.

Таблиця 4

Кореляційна таблиця «*Час випробування*» – «*Чинник зсуву* v_i »

Час випробування $t_в$		Чинник зсуву v_i			$n_{t_в}$
Клас h	Інтервал	$v_{i\min}$ …	…	… $v_{i\max}$	
1	$t_в^1 \dots t_в^i$	Кількість сумісних проявів по класах із таблиці 2: $n_{t_{вi}v_i}$	…	...	Сумарне значення по строчці
…	…	…	...	…	...
b	$t_в^j \dots t_в^n$	…	...	…	...
n_{v_i}		Сумарне значення по стовпцю	…	...	Загалом

Для спрощення подальшого обчислення вибіркового коефіцієнта кореляції необхідно трансформувати кореляційні таблиці інтервальних рядів у кореляційні таблиці умовних варіантів, для чого введемо умовні змінні u і w:

$$\overline{u}_i = \frac{\overline{v}_i - c_1}{\Delta h_1};\ \overline{w}_i = \frac{\overline{t}_в^i - c_2}{\Delta h_2},$$

де c_1, c_2 – хибний нуль, Δh_1, Δh_2 – інтервал кроку.

Тут слід зауважити, якщо варіаційні ряди чинників зсуву розбивалися методом рівних інтервалів, то ширина інтервалів одного інтервального ряду має рівні значення; якщо для розбивки варіаційного ряду використовувалася кластерна класифікація (будь-який метод відшукання подібності на кшталт евклідової відстані), то незважаючи на розбивку варіаційного ряду методом рівних інтервалів, ширина для різних інтервалів не буде однаковою.

Вибірковий коефіцієнт кореляції $r_в = \left(\sum n_{uw} vt - n\overline{vt}\right) \Big/ \left(n\overline{\sigma}_v \overline{\sigma}_t\right)$ при заміні змінних на умовні трансформується до вигляду:

$$r_в = \frac{\sum n_{uw} uw - n\overline{uw}}{n\overline{\sigma}_u \overline{\sigma}_w}, \qquad (6)$$

де $\overline{\sigma}_v$, $\overline{\sigma}_t$, $\overline{\sigma}_u$, $\overline{\sigma}_w$ – вибіркові середні квадратичні відхилення.

Трансформовані кореляційні таблиці умовних варіантів для різних комбінацій інтервальних рядів мають вигляд табл. 5.

Таблиця 5

Кореляційна таблиця умовних варіантів «Час випробування» – «Чинник зсуву v_i *»*

$w_{t_в}$		u_{v_i}			$n_{w_{t_в}}$
Клас h	Інтервал	-1	0	1	
1	$t_в^1 \dots t_в^i$	Кількість сумісних проявів по класам з таблиці 2: n_{uw}	…	...	Сумарне значення по строчці
…	…	…	...	…	...
b	$t_в^j \dots t_в^n$	…	...	…	...
$n_{u_{v_i}}$		Сумарне значення по стовпцю	…	...	Загалом

Обчислимо значення $\sum n_{uw}uw$ для кореляційних таблиць умовних варіантів, перетворивши їх до вигляду табл. 6.

Таблиця 6

Розрахункова таблиця умовних варіантів «Час випробування» – «Чинник зсуву v_i»

$w_{t_в}$		u_{v_i}			$U=\sum n_{uw}u$
Клас h	Інтервал	-1	0	1	
1	$t_в^1 \dots t_в^i$	$n_{uw}u$ n_{uw} $n_{uw}w$	… … …	… … …	…
…	…	… … …	… … …	… … …	...
b	$t_в^j \dots t_в^n$	… … …	… … …	… … …	...
$W=\sum n_{uw}v$		…	…	...	Загалом
uW					$\sum_u uW$

Обчислення вибіркового коефіцієнту кореляції для множини досліджуваних варіаційних рядів здійснюється за виразом (6), при цьому значення $\overline{u}$ і $\overline{w}$ обчислюються виходячи з означення середньої:

$$\overline{u}=\frac{\sum n_u u}{n};\ \overline{w}=\frac{\sum n_w w}{n};\ \overline{u}^2=\frac{\sum n_u u^2}{n};\ \overline{w}^2=\frac{\sum n_w w^2}{n},$$

а середньоквадратичне відхилення за виразами:

$$\overline{\sigma}_u=\sqrt{\overline{u}^2-(\overline{u})^2}\ ,\ \overline{\sigma}_w=\sqrt{\overline{w}^2-(\overline{w})^2}\ .$$

Для того, щоб перейти від вибіркових коефіцієнтів кореляції до коефіцієнтів зсуву у матриці (2) можна скористатися рівняннями лінійної регресії виду:

$$\overline{y}_x-\overline{y}=r_в\frac{\overline{\sigma}_y}{\overline{\sigma}_x}\left(x-\overline{x}\right), \tag{7}$$

де $\overline{\sigma}_y$, $\overline{\sigma}_x$ – вибіркові середні квадратичні відхилення, $\overline{\sigma}_y=\Delta h_1\overline{\sigma}_u$, $\overline{\sigma}_x=\Delta h_1\overline{\sigma}_w$; $\overline{x}=\overline{u}\Delta h_1+c_1$; $\overline{y}=\overline{w}\Delta h_2+c_2$.

Розв'язок рівняння (7) буде представлений у вигляді:

$\overline{y}_x=ax+b$, де a і b числа. Отже, матриця (2) набуде вигляду:

	z_1	z_2	...	z_n
v_1	$a_{11}v_1+b_{11}$	$a_{12}v_1+b_{12}$	...	$a_{1n}v_1+b_{1n}$
v_2	$a_{21}v_2+b_{21}$	$a_{22}v_2+b_{22}$	...	$a_{2n}v_2+b_{2n}$,
...	...	...	...	...
v_m	$a_{m1}v_m+b_{m1}$	$a_{m2}v_m+b_{m2}$	...	$a_{mn}v_m+b_{mn}$

(8)

в якій $\omega_{ji}=a_{ji}v_j+b_{ji}$.

За такого представлення матриці (2) згортка ω_{ji} по i-тій групі ОВТ здійснюється сумою елементів окремого стовпчика. Проте, одержаний результат не можна використати

у виразі (4), так як за фізичним сенсом згортка не є коефіцієнтом, як представлялося у [25], і який перебуває у межах: $0 < \omega < 1$ – при зменшенні реального часу випробувань; $1 < \omega < +\infty$ – при збільшенні реального часу випробувань, якщо ω=1 то чинники зсуву не впливають на час випробування зразку.

Тобто ми одержали не безрозмірну величину, а час випробувань під дією чинників зсуву. Для представлення більш чіткого фізичного сенсу при досліджені кореляції пари випадкових величин «прояв чинника зсуву» – «час випробувань» бажано досліджувати не час випробувань, а відхилення часу випробувань від запланованого $\Delta t_в^i = t_{в\ real}^i - t_{в\ plan}^i$. В цьому випадку прогнозований час випробувань зразку *i*-тої групи ОВТ становитиме:

$$t^{*Gi} = s_{ki}\left(\omega_i^G + M\left[t_в\right]\right), \tag{9}$$

де ω_i^G – згортка вагових коефіцієнтів z_i-го стовпчика матриці (8): $\omega_i^G = \left(a_{1i}v_1 + b_{1i}\right) + \left(a_{2i}v_2 + b_{2i}\right) + ... + \left(a_{mi}v_m + b_{mi}\right)$; $M\left[t_в\right]$ – математичне сподівання часу випробувань ОВТ.

Далі зробимо зауваження та ремарки із застосування кореляційного аналізу до прогнозування реального часу випробувань, що може виявитись корисним при практичних обчисленнях.

1. Передбачалося, але раніше не оговорювалося, що наведений порядок розрахунку застосовується до всієї статистичної сукупності даних, проте, як зазначалося вище, одні й ті ж чинники зсуву можуть по різному впливати на зразки різних груп ОВТ. Тому, для досягнення достовірного результату, кореляційний аналіз доцільно застосовувати також до всіх груп ОВТ з множини $\{Z\}$.

2. Статистичний матеріал з виконання випробувань ОВТ за три роки є доволі об'ємним за кількістю випробувань, це робить генеральну сукупність «спроможною», але робить задачу аналізу надскладною, як за обсягом обчислень, так і за часом, що потребується на опис проявів чинників зсуву часу випробувань. З іншого боку, зважаючи на велику кількість груп ОВТ (випробування проводилося по 25 групах ОВТ) не можна просто зменшувати період аналізу даних. У цьому випадку, на погляд авторів, можна скористатися репрезентативною вибіркою як для всієї сукупності даних, так і при дослідженні окремих груп ОВТ (де кількість випробувань була достатньо великою).

3. Для зменшення кількості операцій обробки даних можна перегрупувати раніше утворені групи ОВТ, по яких виконується статистичний звіт, з метою зменшення їх кількості (об'єднати споріднені групи ОВТ). Також можна припустити виключення заздалегідь очевидних випадків відсутності кореляції, наприклад вплив погодних умов при лабораторних випробуваннях у закритих приміщеннях.

4. Для встановлення кореляції по видах випробування може виявитися достатнім дослідження всієї генеральної сукупності даних, не звужуючи аналіз до окремих груп ОВТ. Таке припущення базується на тому, що процедурність для окремих видів випробувань є однаковою для всіх груп ОВТ, проте, це припущення потребує практичної перевірки.

5. При формуванні переліку чинників зсуву не бажано обирати та досліджувати «людський чинник фахівця з випробувань». Хоча може здатися, що час проведення випробувань напряму залежить від дослідів і практичних випробувань фахівця. Проте практика «заганяти» фахівця у жорсткі часові рамки може негативно вплинути на якість і ретельність самих випробувань. Крім того, зважаючи на великий перелік ОВТ, яку випробовує і сертифікує випробувальна установа, і яка має обмежений штат, кількість фахівців, що може випробовувати конкретну систему і має по ній досвід, рідко перевищує одного – двох. Тому, втрачається сенс досліджень кореляції одного фахівця, який, скоріше за все, однаково інтенсивно виконує задачі по всій техніці.

6. Обчислені вибіркові коефіцієнти характеризують лінійну залежність впливу чинника зсуву на час випробувань. Методами кореляційного аналізу можна оцінити нелінійність залежності, проте, визначити форму залежності доволі складно, що дещо зменшує точність прогнозу.

7. У процесі аналізу статистики спостерігаються випадки призупинення або перенесення випробувань окремих зразків, що пов'язане з їх непідготовленістю або усуненням виявлених недоліків. Згодом, за певний час, випробування продовжують. При застосуванні кореляційного аналізу до таких випадків, всі відокремлені фрагменти випробування одного зразка потрібно об'єднати. Інакше, можна прийти до помилкового статистичного висновку, що непідготовленість зразка зменшує час його випробувань.

8. Аналіз наявного статистичного матеріалу результатів випробувань показує по деяких групах ОВТ малу чисельність або взагалі відсутність випробувань. З огляду на це визначення поправки на вид випробувань s_{ki} таких груп ОВТ практично неможлива, тому має сенс використати поправки s_k, які визначені по всій сукупності результатів випробувань.

9. Зважаючи на обсяги обчислень при визначені вибіркових коефіцієнтів кореляції, практичну мету прогнозування реального часу випробувань і, можливо, потребу в подальшому уточненні й корегуванні коефіцієнтів кореляції виникає потреба в автоматизації статистичної обробки інформації і вироблення поправок при плануванні проведення випробувань.

Висновки відповідно до статті. Застосування кореляційного аналізу для прогнозування реального часу випробувань дозволить підвищити рівень точності і надійності прогнозів, так як встановлює об'єктивні відхилення часу випробування під дією зовнішніх та внутрішніх чинників, що супроводжують процес випробувань. Практична реалізація ідеї прогнозування часу випробувань можлива лише у складі підсистеми автоматизованого планування та управління випробуваннями, де прогнозування буде здійснюватись на етапі планування при введенні умов проведення випробування.

Безумовно, при практичній реалізації потребується оцінка результатів прогнозів, а накопичення та обробка нових статистичних даних дозволить проводити поточне уточнення коефіцієнтів матриці зсуву. Зважаючи на великий обсяг обчислень при визначені коефіцієнтів кореляції і потреба в їх періодичному уточнені, актуальною є задача розробки і автоматизації алгоритмів обчислення поправочних коефіцієнтів часу випробувань, з метою їх подальшого застосування при прогнозуванні реального часу випробувань у складі підсистеми автоматизованого планування та управління випробуваннями.

Список використаних джерел

1. ДСТУ 3021-95. Випробування і контроль якості продукції. Терміни та визначення. [Чинний від 1996-01-01]. Київ : Держстандарт України, 1995. 71 с.

2. Про затвердження Порядку складання єдиного наскрізного плану створення зразка (системи, комплексу) озброєння, військової і спеціальної техніки : Постанова Кабінету Міністрів України № 449 від 26 червня 2013 р.

3. ГОСТ В 15.211-78. СРПП ВТ. Порядок разработки программ и методик испытаний опытных образцов изделий. Основные положения.

4. ГОСТ В 15.307-77. СРПП ВТ. Испытания и приемка серийных изделий. Основные положения.

5. Hank J. E., Reitsch A. J., Wichem D. W. Business Forecasting, 7th ed., Prentice-Hall, Upper Saddle River, N.J., 2001.

6. Моделі й методи соціально-економічного прогнозування / Гаєць В. та ін. Харків : Вид-во ХДЕУ, 2003. 270 с.

7. Карпов В. А., Кучеренко В. Р. Маркетинг: прогнозування кон'юнктури ринку : навч. посіб. Київ : Т-во «Знання», КОО, 2001. 215 с.

8. Hill T. Manufacturing Strategy, 3rd ed., Irwin/McGraw-Hill, New York, 2000.

9. Smith H. L. The social forecasting industry. *Climatic Change.* 1987. Vol. 11. Pp. 35–60. https://doi.org/10.1007/BF00138794.

10. Freeman H. E., Rossi P. H. Furthering the applied side of sociology. *American Sociological Review*. 1984. Vol. 49. Pp. 571–580.

11. Ascher W. *Forecasting: An Appraisal for Policy-makers and Planners*. Johns Hopkins University Press, Baltimore. 1978.

12. Комплексне демографічне дослідження в Україні / за ред. чл.-кор. НАНУ, д.е.н., проф. Е. М. Лібанової. Київ : Український центр соціальних реформ, 2005. 190 с.

13. World Population Prospects: The 2010 Revision / United Nations ; Department of Economic and Social Affairs ; Population Division, 2011.

14. Allan H. Murphy; Robert L. Winkler. Probability Forecasting in Meterology. *Journal of the American Statistical Association*, Sep., 1984. Vol. 79, No. 387. Pp. 489–500.

15. Air Weather Service. "Probability Forecasting: A Guide for Forecasters and Staff Weather Officers", IL: U.S. Air Force, Headquarters Air Weather Service, Scott Air Force Base. 1978. Pamphlet No. 105–51.

16. David J., Basic Reliability Prediction Theory in Reliability, Maintainability and Risk (Ninth Edition), 2017.

17. Половко А. М. Основы теории надёжности. Москва : Наука, 1964. 446 с.

18. Каневский З. М., Литвиненко В. П. Теория скрытности. Воронеж : ВГУ, 1991. 144 с.

19. Бестужев-Лада И. В., Саркисян С. А., Минаев Э. С., Мельникова Е. Н. Рабочая книга по прогнозированию. Москва : Мысль, 1982. 428 с.

20. Барабаш О. В. Построение функционально устойчивых распределенных информационных систем. Киев : НАОУ, 2004. 226 с.

21. Borzemski L., Kaminska-Chuchmala A. Spatial web performance forecasting with sequential gaussin simulation method. *Information Systems Architecture and Technology*. Poland, Wroclaw: Oficyna Wydawnicza PWr, 2011. Pp. 37-46.

22. Добровольський В. К., Стогній О. В., Костюк В. О., Каплін М. І. Економіко-математичне моделювання енергетичних систем / Ін-т загальної енергетики НАН України. Київ : Наукова думка, 2013. 252 с.

23. Воробйов О. В., Воробйов П. О. Вдосконалений метод прогнозування фрактальних процесів для систем підтримки прийняття рішень. *Системи обробки інформації*. 2010. Вип. 6(87). С. 191–193.

24. Прогнозування. *Філософський енциклопедичний словник* / В. І. Шинкарук (гол. редкол.) та ін. Київ : Інститут філософії імені Григорія Сковороди НАН України : Абрис, 2002. 742 с.

25. Корнієнко С. П., Корнієнко І. В., Павленко А. Г., Камак Д. О. Підхід до прогнозування часу проведення випробувань озброєння та військової техніки. *Новітні технології. Збірник наукових праць Приватного вищого навчального закладу «Університет новітніх технологій».* 2019. № 3 (10). С. 94-100.

26. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. Москва : Наука, 1969. 576 с.

27. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика. Москва : Высшая школа, 1977. 479 с.

28. Корнієнко І. В., Хома В. П., Корнієнко С. П. Спосіб кореляційного визначення ступеню впливу об'єктивних чинників на кількість відібраних кандидатів на військову службу за контрактом. *Труди університету*. 2012. № 2(108). С. 158–166.

29. Корнієнко І. В., Камак Д. О., Руденко О. В., Москалець С. В. Автоматизація підсистеми планування випробувань. *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2020)* : матеріали тез доповідей X Міжнародної науково-практичної конференції (м. Чернігів, 29–30 квітня 2020 р.) : у 2 т. Чернігів : ЧНТУ, 2020. Т. 2. С. 206.

30. Корнієнко І. В., Корнієнко С. П., Походенко О. М., Казначей С. М., Руденко О. В. Графічне представлення моделі функціонування випробувальної організації. *Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки*. 2019. Вип. 2. С. 91–98.

31. Гмурман В. Е. Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике. Москва : Высшая школа, 1970. 239 с.

32. Вуколов Э. Л. Основы статистического анализа. Практикум по статистическим методам и исследованию операции с использованием пакетов STATISTICA и EXCEL : учебное пособие. 2-е изд., исправ. и доп. Москва : ФОРУМ. 2008. 464 с.

References

1. Kyiv Research Institute of Radio Measuring Equipment (KNDIRVA). (1995). *Vyprobuvannia i kontrol yakosti produktsii. Terminy ta vyznachennia* [*Product testing and quality control. Terms and definitions*] (DSTU 3021-95).

2. *Pro zatverdzhennia Poriadku skladannia yedynoho naskriznoho planu stvorennia zrazka (systemy, kompleksu) ozbroiennia, viiskovoi i spetsialnoi tekhniky [About the statement of the Order of drawing up of the uniform through plan of creation of a sample (system, complex) of the armament, military and special equipment],* Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine № 449 (26.06.2013) (Ukraine).

3. *Poriadok razrabotki programm i metodik ispyitaniy opyitnykh obraztsov izdelii. Osnovnye polozheniia [The order of development of programs and methods of tests of prototypes of products. Basic provisions*] (1978). (GOST V 15.211-78. SRPP VT).

4. *Ispyitaniia i priemka seriynykh izdelii. Osnovnye polozheniia [Testing and acceptance of serial products. Basic provisions].* (1977). (GOST V 15.307-77. SRPP VT).

5. Hank, J. E., Reitsch, A. J., and Wichem, D. W. (2001). *Business Forecasting* (7th ed.). Prentice-Hall, Upper Saddle River, N.J.

6. Haiets, V., Klebanova, T., Ivanov, V. ta in. (2003). *Modeli i metody sotsialno-ekonomichnoho prohnozuvannia [Models and methods of socio-economic forecasting].* KhDEU.

7. Karpov, V. A., Kucherenko, V. R. (2001). *Marketynh: prohnozuvannia koniunktury rynku [Marketing: forecasting market conditions].* Znannia.

8. Hill, T. (2000). *Manufacturing Strategy*. (3rd ed.). Irwin/McGraw-Hill.

9. Smith, H. L. (1987). The social forecasting industry. *Climatic Change*, 11, pp. 35–60. https://doi.org/10.1007/BF00138794

10. Freeman, H. E., and Rossi, P. H. (1984). Furthering the applied side of sociology. *American Sociological Review*, 49, pp. 571–580.

11. Ascher, W. (1978). *Forecasting: An Appraisal for Policy-makers and Planners*, Johns Hopkins University Press.

12. Libanova, E. M. (2005). *Kompleksne demohrafichne doslidzhennia v Ukraini [Comprehensive demographic research in Ukraine].* Ukrainskyi tsentr sotsialnykh reform.

13. United Nations; Department of Economic and Social Affairs; Population Division. (2011). *World Population Prospects*: The 2010 Revision.

14. Allan H. Murphy, Robert L. Winkler. (Sep., 1984). Probability Forecasting in Meterology. *Journal of the American Statistical Association*, *79*(387), pp. 489–500.

15. Air Weather Service. (1978). Probability Forecasting: A Guide for Forecasters and Staff Weather Officers. IL: U.S. Air Force, Headquarters Air Weather Service, Scott Air Force Base. Pamphlet No. 105–51.

16. David, J. (2017). Basic Reliability Prediction Theory in Reliability, Maintainability and Risk (Ninth Edition).

17. Polovko, A. M., (1964). *Osnovy teorii nadezhnostei [Fundamentals of reliability theory].* Nauka.

18. Kanevskiy, Z. M., Litvinenko, V. P. (1991). *Teoriia skryitnosti [Stealth theory]*. VGU.

19. Bestuzhev-Lada, I. V., Sarkisyan, S. A., Minaev, E. S., Melnikova, E. N. (1982). *Rabochaia kniga po prognozirovaniyu [Forecasting workbook].* Mysl.

20. Barabash, O. V. (2004). *Postroenie funktsionalno ustoichivykh raspredelennykh informatsionnykh sistem [Construction of functional stability of distributed information systems]*. NAOU.

21. Borzemski, L., and Kaminska-Chuchmala, A. (2011). Spatial web performance forecasting with sequential gaussin simulation method. In *Information Systems Architecture and Technology*. Oficyna Wydawnicza PWr (pp. 37-46).

22. Dobrovolskyi, V. K., Stohnii, O. V., Kostiuk, V. O., Kaplin, M. I. (2013). *Ekonomiko-matematychne modeliuvannia enerhetychnykh system [Economic and mathematical modeling of energy systems].* Naukova dumka.

23. Vorobiov, O. V., Vorobiov, P. O. (2010). Vdoskonalenyi metod prohnozuvannia fraktalnykh protsesiv dlia system pidtrymky pryiniattia rishen [An improved method for predicting fractal processes for decision support systems]. *Information processing systems*, 6(87), pp. 191–193.

24. Shynkaruk, V. I. (2002). Prohnozuvannia [Forecasting]. In *Filosofskyi entsyklopedychnyi slovnyk – Philosophical encyclopedic dictionary*. Abrys.

25. Korniienko, S. P., Korniienko, I. V., Pavlenko, A. H., & Kamak, D. O. (2019). Pidkhid do prohnozuvannia chasu provedennia vyprobuvan ozbroiennia ta viiskovoi tekhniky [Approach to predicting the timing of weapons testing and military equipment]. *Novitni tekhnolohiyi. Zbirnyk naukovykh prats PVNZ «Universytet novitnikh tekhnolohii» – New technologies. Collection of scientific works of the Private Higher Educational Institution "University of New Technologies"* (pp. 94–100).

26. Venttcel, E. S. (1969). *Teoriia veroiatnostei [Probability theory]*. Nauka.

27. Gmurman, V. E. (1977). *Teoriia veroiatnostei i matematicheskaia statistika [Theory of probability and mathematical statistics]*. Vysshaia shkola.

28. Korniienko, I. V., Khoma, V. P., Korniienko, S. P. (2012). Sposib koreliatsiinoho vyznachennia stupeniu vplyvu obiektyvnykh chynnykiv na kilkist vidibranykh kandydativ na viiskovu sluzhbu za kontraktom [Method for correlation of degree of influence of objective factors on number of selected candidates for military service under contract]. *Trudy universytetu – NAOU "University Works"* (pp. 158–166).

29. Korniienko, I. V., Kamak, D. O., Rudenko, O. V., Moskalets, S. V. (2020). *Avtomatyzatsiia pidsystemy planuvannia vyprobuvan [Automation of the test planning subsystem]*. ChNTU.

30. Korniienko, I. V., Korniienko, S. P., Pokhodenko, O. M., Kaznachei, S. M., & Rudenko, O. V. (2019). *Hrafichne predstavlennia modeli funktsionuvannia vyprobuvalnoi orhanizatsii [Graphical representation of the model of the testing organization functioning]. Zbirnyk naukovykh prats' Derzhavnoho naukovo-doslidnoho instytutu vyprobuvan' i sertyfikatsiyi ozbroyennya ta viys'kovoyi tekhniky – DNDI VS OV* (pp. 91-98).

31. Gmurman, V. E. (1970). *Rukovodstvo k resheniyu zadach po teorii veroyatnostey i matematicheskoy statistike [A guide to solving problems in probability theory and mathematical statistics]*. Vysshaia shkola.

32. Vukolov, E. L. (2008). *Osnovyi statisticheskogo analiza. Praktikum po statisticheskim metodam i issledovaniyu operatsii s ispolzovaniem paketov STATISTICA i EXCEL [Fundamentals of Statistical Analysis. Workshop on Statistical Methods and Operation Research Using the STATISTICA and EXCEL Packages]*. Forum.

UDC 519.872.4

Svitlana Korniienko, Ihor Korniienko, Volodymyr Dmytriiev,
Anatolii Pavlenko, Oleh Skyba

APPLICATION OF CORRELATION ANALYSIS METHODS TO PROBLEM FORECASTING REAL TIME FOR TEST OF WEAPONS AND MILITARY EQUIPMENT

Urgency of the research. *Testing of armaments and military equipment is an important and responsible state task. The testing process has regulatory time constraints, which ensures the timely implementation of state programs for the adoption of the latest models. Often during the tests there are time deviations and delays from the planned deadlines, which jeopardizes the success of the state task. Therefore, the actual task is to predict real-time testing.*

Target setting. *The efficiency of the military test organization is determined by a clear and well-established process of conducting mass tests of the latest models of weapons and military equipment. Test disruptions and time deviations from the plan, which have a certain stochastic nature, can reduce the efficiency of the whole process of mass trials. This raises to the problem forecasting real-time for tests of individual samples of weapons and military equipment.*

Actual scientific researches and issues analysis. *Today there are many fundamental and applied works on the formation of forecasts of both natural phenomena and in various spheres of human activity. Recently, many scientific papers have been published on the problems of improving the efficiency of tests, including through automation.*

Uninvestigated parts of general matters defining. *The problem is to determine the magnitude and nature of the influence of external and internal factors on the real time of testing individual samples.*

The research objective. *To normalize the planned test activities of the test facility, it is necessary to determine a method that, based on available statistical material on the course of the tests, will quantify the magnitude and nature of the influence of external and internal factors on the time of testing. Also, using this method, you can get an a priori estimate of the possible deviation of the test time of a particular model of weapons and military equipment.*

The statement of basic materials. *The approach to obtaining quantitative values of the influence of time shift factors on the test process was considered. The correction factor of the test type was substantiated and added to the general expression of the calculation of real-time tests. The mathematical apparatus of correlation analysis for studying the degree and nature of the influence of internal and external factors on real-time tests of a specific sample of armaments and military equipment was considered and prepared for algorithmization. Remarks and comments on the application of correlation analysis to real-time forecasting of tests were made.*

Conclusions. *The use of correlation analysis to predict real-time test time will allow establishing objective indicators of deviation of test time under the influence of external and internal factors accompanying the test process. The use of forecasts as part of the automated subsystem of planning and quality management of tests will normalize the course of the test process and minimize the negative impact of external and internal factors.*

Keywords: *automation; tests; forecasting; time; armament and military equipment.*

Table: 6. Fig.: 1. References: 32.

Корнієнко Світлана Петрівна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри промислового та цивільного будівництва, Національний університет «Чернігівська політехніка» (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).
Korniyenko Svitlana – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Industrial and Civil Engineering, Chernihiv Polytechnic National University (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).
E-mail: cornel@ukr.net
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-9162-1229

Корнієнко Ігор Валентинович – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри геодезії, картографії та землеустрою, Національний університет «Чернігівська політехніка» (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).
Korniyenko Ihor – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Head of Department of geodesy, cartography and land planning, Chernihiv Polytechnic National University (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).
E-mail: cornel@ukr.net
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9105-0780

Дмитрієв Володимир Анатолійович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, заступник начальника інституту з наукової роботи, Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки (вул. Стрілецька, 1, м. Чернігів, 14033, Україна).
Dmytriiev Volodymyr – PhD in Technical Sciences, Senior Researcher, The Laureate of State Prize of Ukraine in sphere of science and technique, Deputy Chief of Institute of Research Work, State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification (1 Striletska Str., 14033 Chernihiv, Ukraine).
E-mail: vadmitriev@ukr.net
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0792-6397

Павленко Анатолій Григорович – кандидат технічних наук, начальник науково-організаційного відділу, Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки (вул. Стрілецька, 1, м. Чернігів, 14033, Україна).
Pavlenko Anatolii – PhD in Technical Sciences, Chief of the Scientific Organizational section, State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification (1 Striletska Str., 14033 Chernihiv, Ukraine).
E-mail: agpav@ukr.net
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6341-8381

Скиба Олег Васильович – науковий співробітник науково-дослідного відділу, Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки (вул. Стрілецька, 1, м. Чернігів, 14033, Україна).
Skyba Oleh – researcher of the Scientific-research Department, State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification (1 Striletska Str., 14033 Chernihiv, Ukraine)..
E-mail: skiborg@i.ua
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6252-6775

Корнієнко С., Корнієнко І., Дмитрієв В., Павленко А., Скиба О. Застосування методів кореляційного аналізу до проблеми прогнозування реального часу випробувань озброєння та військової техніки. *Технічні науки та технології.* 2020. № 3 (21). С. 185-197.

UDC 621.941-229.3:621.822.172
DOI: 10.25140/2411-5363-2020-3(21)-198-202

Maksym Grytsiv, Marek Sukop, Peter Ferenčík

SIMULATION OF THE TRAJECTORY OF A MOBILE ROBOT IN FLOWCODE

Urgency of the research. *Simulation is used to simulate the real movement of the robot, to test the software and capabilities of the robot before assembling it. It makes it possible to change and improve the program code during the testing process in order to implement it in practice at the end. A simulation is a free testing platform without additional financial costs.*

Target setting. *Simulate the movement of a robot using Flowcode, without composing a real robot when it is unavailable.*

Actual scientific researches and issues analysis. *Currently, research focuses on similar issues, as there are currently limitations through which design and testing takes place remotely outside the workshops.*

Uninvestigated parts of general matters defining. *The current solution of using the Flowcode program allows the implementation of programming, modelling, and simulation of work in one program.*

The research objective. *The purpose of the article is to give an idea of how to do a robot motion simulation to test the functionality of program code without using physical robot.*

The statement of basic materials. *For realization the robot simulation, need to have computer with basic configuration and a licensed version of Flowcode software installed.*

Conclusions. *The published article presents the idea of programming and simulating the movement of a mobile robot using Flowcode software, which will help reduce financial costs and time before creating a real robot. Testing the functionality of the program code and the possibility of remote operation without a physical object.*

Keywords: *simulation; mobile robot; Flowcode.*
Fig.: 12. References: 3.

Introduction. Flowcode is a Microsoft Windows-based development environment commercially manufactured by Matrix TSL for programming embedded devices based on PIC, AVR (including Arduino), and ARM technologies using graphical programming styles (such as flowcharts) and mandatory programming styles (via C and Pseudocode). It is currently in the eighth revision.

Flowcode is designed to simplify complex functions such as Bluetooth, mobile phones, communication, USB communication, etc. Using pre-developed libraries of dedicated component functions. This is accomplished by dragging virtual representations of the hardware to the visual panel, providing access to associated libraries. Flowcode is therefore ideal for speeding up software development time, allowing those with little programming experience to get started and help with projects. This is suitable for formal teaching of microprocessor programming principles.

Also it allows the user to develop and display their program using four different visual modes. These are the flowchart display, the block display (block-inspired graphical programming paradigm), the C code display, and the Pseudocode display [1].

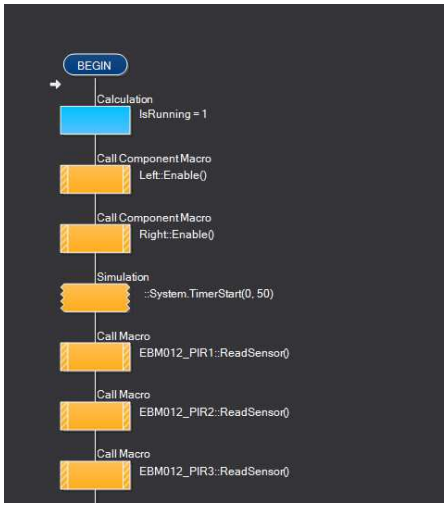


Fig. 1. Initialization

Pogram code. First, we will create functional blocks responsible for the initialization of sensors, motors and the rest of the simulation of the robot's motion process. This part of the program runs only once because it is before the main part of the program. Here, the robot's speed, inputs and outputs are set, and the simulation is controlled. Figure 1 shows what initializations take place.

© Максим Гриців, Марек Сукоп, Петер Ференчік, 2020

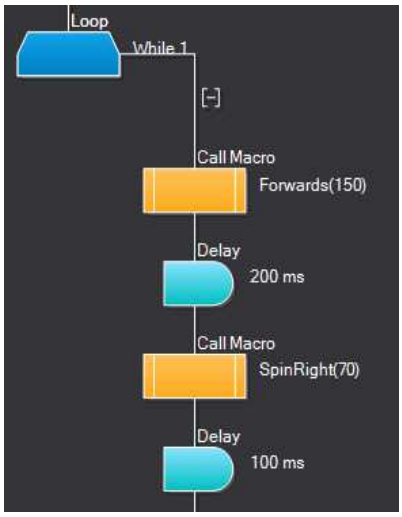


Fig. 2. Main program 1 [3]

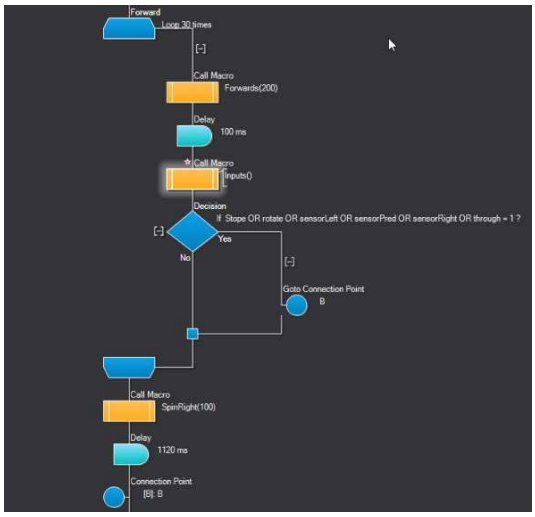


Fig. 3. Main program 2 [3]

"Main" is mainly a macro in the program for controlling a mobile robot, which contains many individual parts and the use of other macros. The principle of robot control consists of a main path, which the robot repeats the movement of which is carried out by sending PWM signals to individual motors. Using of three IR sensors, the input signals are processed and, as a result, change the movements of the robot, so that it does not collide with obstacles and can bypass them. It also includes software for using various buttons and switches, containing special functions of the robot. The initialization of the simulation is at the beginning, and the simulation macros are used throughout the control. The robot should move autonomously but has also the opportunity to communicate with an operator who can change its movement.

This program may contain many additional functions that vary from the needs of the developer and the capabilities of the robot. In particular, these are blocks that are responsible for certain additional keys, additional actions when receiving signals from sensors, which can also be added and configured in addition to the main part of the program.

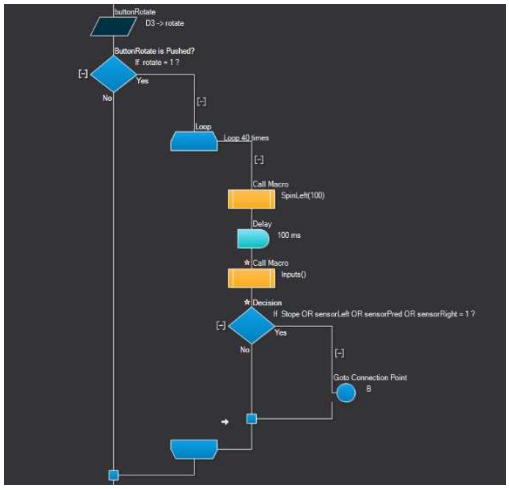


Fig. 4. Additional program of random changes of direction

The main part of the robot motion simulation consists of the following parts:

- Ev_Timer
- Movement macros.

The first and most important is responsible for the functionality of the simulation and its reproduction in the simulation field, the subsequent ones are responsible for the speed of movement of specific parts of the robot and the reproduction of this movement on the simulation field.

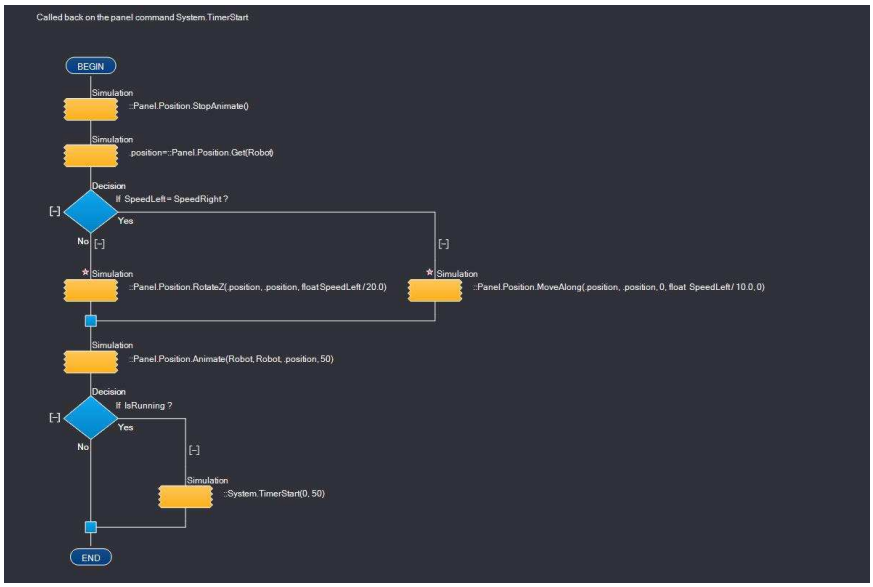


Fig. 5. Ev_Timer [2]

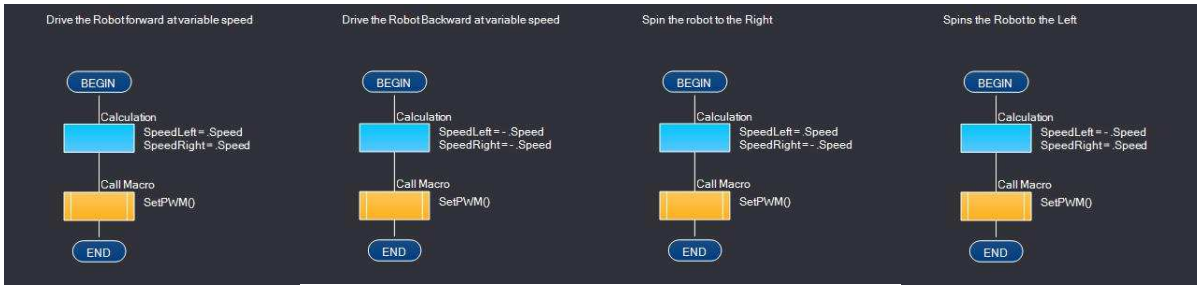


Fig. 6. Movement macros

3D Model. To visualize the movement of a mobile robot, a prototype was created in the form of a 3D model with all its parts in real size. This was done using the same Flowcode program in the Creative tab. The 3D model could also be created in other programs designed specifically for modeling, but to save time and test the performance of all functions of the robot movement program, the built-in capabilities of Flowcode were enough.

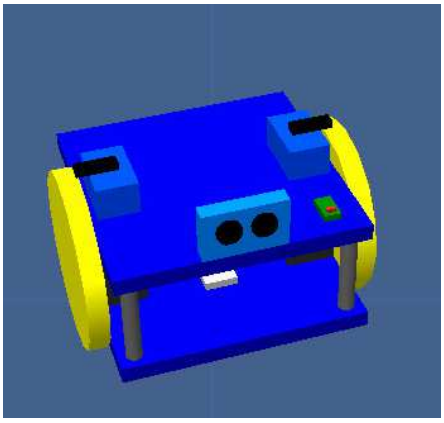


Fig. 7. 3D model 1

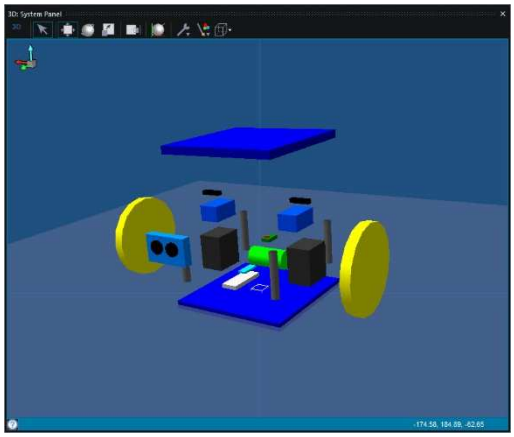


Fig. 8. 3D model 2

Dashboard Panel contains 3x IR sensors for simulation of obstacle detection, green On / Off switch, red button of special robot rotation function, switch for robot forward control, 2x PWM graphs and 2 LED diodes for monitoring incoming signals from motors. Here, when the simulation is switched on, we control all changes of input parameters and we can monitor the output signals, can see at Figure 9.

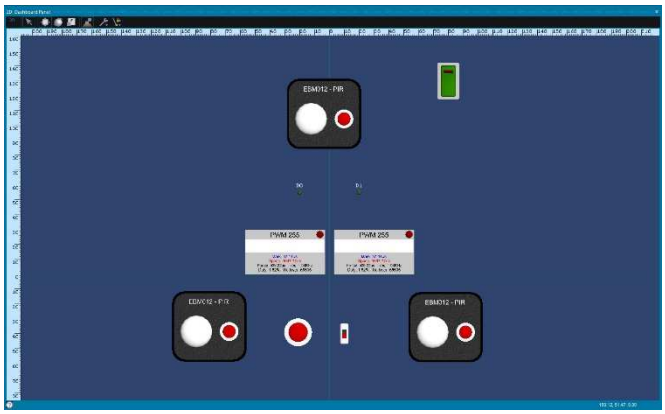


Fig. 9. Dashboard Panel

To start the simulation, we need to run the program, open the simulation field. Using the Dashboard panel, we manage all changes and simulate real obstacles to testing the functionality of the conceived solution. Figures 10, 11 and 12 show the simulation results and robot movement.

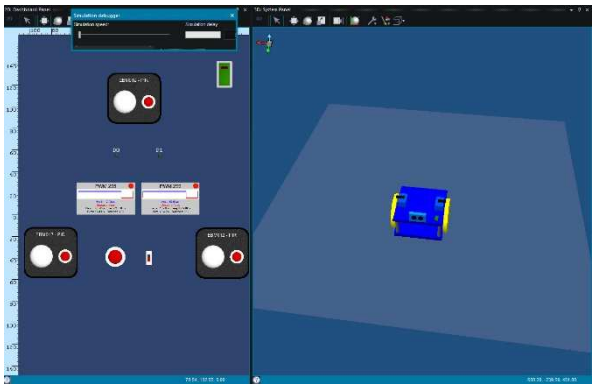


Fig. 10. Simulation results 1

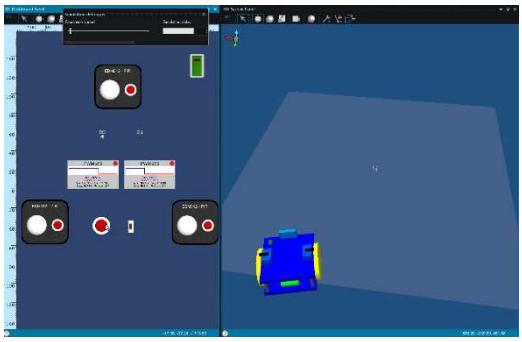


Fig. 11. Simulation results 2

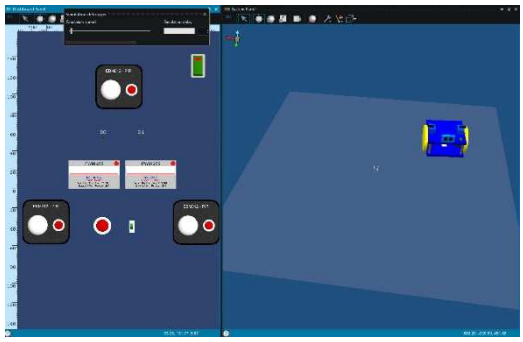


Fig. 12. Simulation results 3

Conclusions. Using the Flowcode program helps to properly invest time and resources in such a way that it would be economical, comfortable, and quick to create a simulation of the movement of a mobile robot without creating a real prototype. The robot model can be created considering the real dimensions in the program itself, the code can be programmed and tested.

References

1. Flowcode. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-09-14]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Flowcode.

2. Flowcode: Main. Matrixtsl [online]. [cit. 2020-09-14]. Dostupné z: https://www.matrixtsl.com/wiki/index.php?title=Main_Page.

3. GRYTSIV, Maksym. Hardvérové a softvérové vybavenie riadiaceho systému servisného robota: Košice, 2020. Diplomová práca. Technická Univerzita v Košiciach. Vedúci práce Doc. Ing. Marek Sukop PhD.

УДК 621.941-229.3:621.822.172

Максим Гриців, Марек Сукоп, Петер Ференчік

МОДЕЛЮВАННЯ ТРАЄКТОРІЇ МОБІЛЬНОГО РОБОТА НА ПЛАТФОРМІ LOWCODE

Актуальність теми дослідження. *Симуляція використовується для імітації реального руху робота, для перевірки програмного забезпечення та можливостей робота перед його збіркою. Це дає можливість змінювати і покращувати програмний код в процесі тестування, щоб в кінці реалізувати його на практиці. Симуляція – це безкоштовна платформа для тестування без додаткових фінансових витрат.*

Постановка проблеми. *Змоделювати рух робота за допомогою Flowcode, не створюючи справжнього робота.*

Аналіз останніх досліджень і публікацій. *Нині дослідження зосереджені на аналогічних проблемах, оскільки зараз існують обмеження, через які проектування і тестування проводяться віддалено, поза майстернями.*

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. *Поточне рішення з використанням програми Flowcode дозволяє реалізувати програмування, моделювання і симуляцію роботи в одній програмі.*

Постановка завдання. *Мета статті - дати уявлення про те, як виконати симуляцію руху робота для перевірки функціональності програмного коду без використання фізичного робота.*

Виклад основного матеріалу. *Для реалізації симуляції робота необхідний комп'ютер із базовою конфігурацією і встановленою ліцензійною версією програмного забезпечення Flowcode.*

Висновки відповідно до статті. *В опублікованій статті представлена ідея програмування і моделювання руху мобільного робота з використанням програмного забезпечення Flowcode, що допоможе скоротити фінансові витрати і час для створення справжнього робота. Перевірено працездатність програмного коду та можливість віддаленої роботи без фізичного об'єкта.*

Ключові слова: *моделювання; мобільний робот; Flowcode.*

Maksym Grytsiv – Ing., Technical University of Kosice, Faculty of Mechanical Engineering, Department of robotics (9 Letna Str., 041 00 Kosice, Slovakia).
E-mail: Maksym.Grytsiv@tuke.sk

Marek Sukop – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Technical University of Kosice, Faculty of Mechanical Engineering, Department of robotics (9 Letna Str., 041 00 Kosice, Slovakia).
E-mail: Marek.Sukop@tuke.sk
Scopus Author ID: 36615762200

Peter Ferenčík – Ing., Robert Bosh GmbH (Robert-Bosh-Platz 1, 70839 Gerlingen-Schillerhöhe, Germany).
E-mail: ferencik.p@hotmail.sk

Grytsiv, M., Sukop, M., Ferenčík, P. (2020). Simulation of the trajectory of a mobile robot in Flowcode. *Technical sciences and technologies*, *3*(21), pp. 198-202.

UDC 621.941-229.3:621.822.172
DOI: 10.25140/2411-5363-2020-3(21)-203-208

Marek Vagaš, Jaroslav Šeminský

SELECTED ASPECTS AND SPECIFICS OF THE ROBOTIC ARM PROGRAMMING AT AUTOMATED WORKPLACES

Urgency of the research. *It is important to point out at innovative elements in the field of robotic arm programming. At the same time, we want to provide guidance, how to work with these elements further and implement these principles into the automated workplaces control.*

Target setting. *Purpose of article is to give some form of instruction, how to work with innovative elements for robotic arm programming.*

Actual scientific researches and issues analysis. *Currently, there are already many innovative and user-friendly programming units on the (automation) market today. Therefore, it is necessary to make the professional public aware of the new possibilities of programming robotic arms.*

Uninvestigated parts of general matters defining. *The manufacturer's user manual is the most frequently used in this area, but it does not sufficiently describe some aspects of robotic arm programming. Therefore, we consider it is necessary to address at this issue.*

The research objective. *The aim of article is to provide some kind of instruction, how to work with special equipment, like is programming unit (called also pendant).*

The statement of basic materials. *For realization of advanced programming functions is good to have a suitable material how to solve path sequence and automation process at the workplace.*

Conclusions. *Published article presents selected programming aspects for robotic arm with emphasis to specialities of robotic arm manufacturers. Presented article provides a closer view to some detailed solution regarding robotic arm programming that are not often and sufficient described at providers manual.*

Keywords: *automation; robotic arm; robotic programming.*

Fig.: 8. References: 15.

Introduction. The emphasis is put on implementation of advanced programming algorithms together with a simplifying of the robotic arm programming, and as a whole, is constantly growing. Actual pressures comes from the requirements of (especially) automotive industry as well as from the end customers in the position of users. In addition, the programming environment itself is increasingly developed to become more "user friendly". If manufacturers did not take these aspects and requirements into account, it would easily be the case that their products would cease to be produced, profits would fall and the company would lose its competitiveness. The policies of the companies that offer this software are therefore different. Some of them are more user-friendly, whether in the form of available manuals, a better in the form of the off-line environment, low software prices, broad school support and so on [1]. Other providers of these software focus more on the larger "players" in the market and to the implementation of their products in larger companies, such as automakers or large plants. Teaching materials are usually not commonly available, training is expensive, and so on. From the view of robotic arm control, program must be conceived in a way that its structure represents a flexible sequence of moving steps from robotic arm. Focus is led on achieving the desired trajectory from the end effector to the programmed points with required speed and accuracy [2]. At the same time, each robotic arm manufacturer develops and improves their own programming language for programming that is not compatible with each other. However, there is one exception, which is the Siemens software package, "TECNOMATIX (PLM software)". Through this program, it is possible not only programming of complex robotic arm from many others manufacturers, but also the entire complex workplaces, starting by entering of the input parameters to the final assembly time or ergonomic requirements, see Fig. 1.

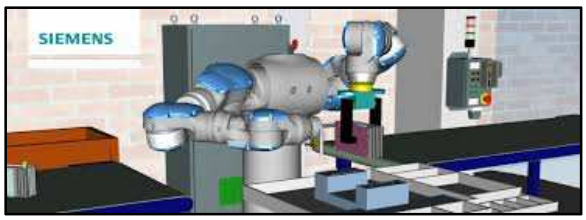


Fig. 1. Siemens TECNOMATIX - PLM software [3]

© Марек Вагаш, Ярослав Семінський, 2020

Gradually, new industrial languages have been developed for robotic arms that are fast, reliable and relatively simple. An overview of the individual programming languages can be seen at figure 2.

Manufacturer	Programming language
ABB	RAPID
KUKA	KRL (Kuka Robotic Language)
YASKAWA	INFORM
FANUC	KAREL
COMAU	PDL2
STÄUBLI	VAL3
UNIVERSAL ROBOTS	URScript

Fig. 2. Available program languages of the robotic manufacturers

Online programming of the robotic arm. On-line programming is (in principle) always characterized by the presence of operator (programmer) directly at the robotic arm. It is realized by a programming unit called teach pendant. It is equipped with a large brightness display, which presents progress of the program or its current status bar together with a switch between manual and automatic operation and the selection of multiple display windows [4]. Control of the robotic arm in manual mode is characterized by gradual guidance to the individual programming points, which are gradually written by the operator (programmer) into the memory of robotic arm control system. Nowadays, modern programming unit (pendants) are already built based PC. The built-in colour display allows the operator to directly program I/O (inputs / outputs) and other functions and also the advanced operation of the robotic arm depending to the built-in functions of robotic arm control system. Some programming units (e.g. COMAU Robotics) are able transmit data to the robotic arm control system via wireless technology [5]. An overview of programming units - pendants of selected companies is shown at figure 3.



Fig. 3. Selected programmable units – pendants of robotic manufacturers

Off-line programming of the robotic arm. Off-line robotic arm programming begins with a computer model (of the robotic arm, workplace, peripherals) based on increasingly intelligent software packages in an effort to get closer to a real automated workplace. Thus, this type of programming can be characterized as "outside of the automated workplace". The advantage lies mainly in the fact that while automated workplace itself is physically built, their programming activities can be created simultaneously, which leads to great savings in time and costs [6].

Errors are permissible and allowed because there is no risk of any real damage, in addition to the real automated workplace, these ways can be fully tested before their complete physical start-up. Off-line programming enables a complex description of the assigned task, experiments with the structure of the automated workplace, elimination of collision situations or verification of the program in 3D representation, see figure 4.

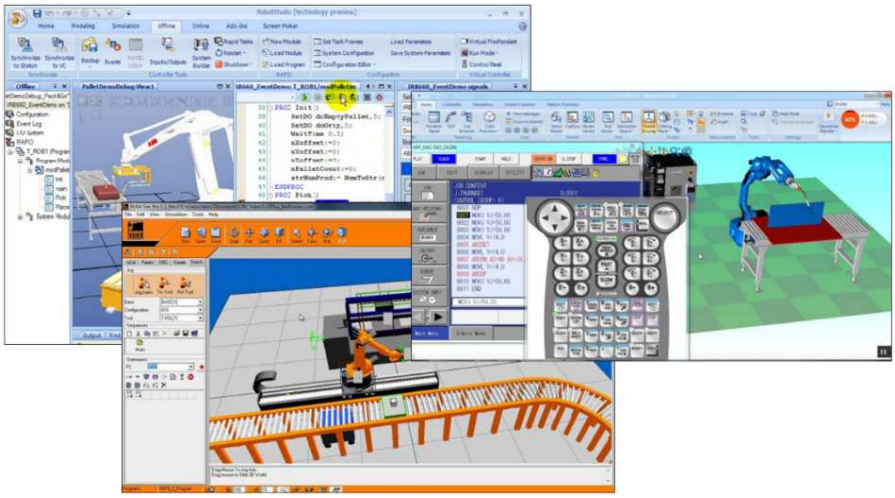


Fig. 4. Overview of some off-line environment from robotic manufacturers

Specifics of the robotic arm programming. Gradual learning - the robotic arm is gradually guided by the operator in this way (programmer) using the buttons directly on the pendant to the individual positions, (in which an action is to be performed, e.g. gripping, or tool operation) and the coordinates of these precisely tuned positions and the orientation of the tool are stored in the memory of the control system [7]. During automatic operation, the robotic arm then uses this data from the memory of the control system. Positions of the individual points and tool orientation at these points are automatically recorded according to the manual setting, in this method. Other functions of the robotic arm are programmed using a PC or directly inside the editor of programming unit [8]. Programming units enable monitoring of inputs / outputs and system information, writing programs in the editor, allowing access to production data (average cycle time, number of production cycles, ...), setting of working parameters e.g. for welding directly from the pendant. More modern units have analytical functions to optimize the work of the robotic arm.

Guidance programming - is very popular and is used to program simple and less accurate application movements (painting, spraying, etc.). The programming process begins with the manual guidance of the robotic arm by the operator (programmer) manually. Control system records this movement, i.e. writes to memory at regular periodic intervals. In particular, data of the position and orientation of tool [9]. When automatic operation is started, the robotic arm plays back the recorded activity. Repetition of the movement path is not entirely accurate, because the robotic arm itself is loaded in the opposite direction when repeating the movement than when guiding along the desired path were [10]. Main reason lays at the deviations that are defined by the clearances in the bearings and the flexibility of the structure have opposite orientations. Another disadvantage of this specificity is presence of the operator, which can cause big problems in small spaces, but the creation of the program is relatively fast.

SmartPAD – it is a specific programming unit, which is characterized by a large and clear display with function keys for speed settings, coordinate system settings and central stop [11]. The specialty is a button for software disconnection of the programming unit as well as a 6D mouse for manual control of the robotic arm, see figure 5.



Fig. 5. Overview of some off-line environment from robotic manufacturers

The specificity of programming lies in the control of individual axes of the robotic arm, which are intuitively controlled by a 6D mouse. Depending on the dominant mode, the control can be used to move one or more axes simultaneously [12]. Robotic arm can move e.g. just by pulling or squeezing this control. Movements at axes X, Y a Z is possible to realize according to the figure 6.

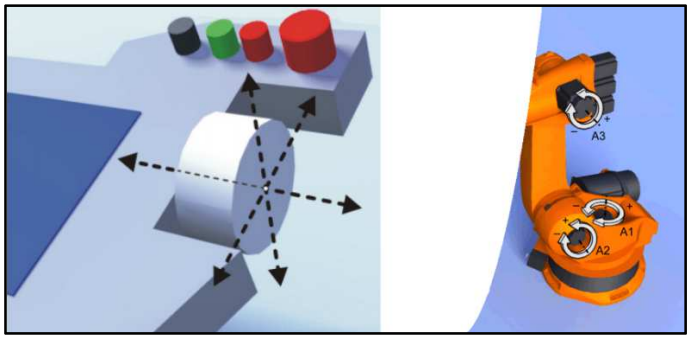


Fig. 6. Movements when pressed or pulling 6D mouse

The robotic arm can also be moved by turning or by tilting the control via 6d mouse. Following rotary movements in the axes A4, A5 and A6 can be realized according to figure 7.

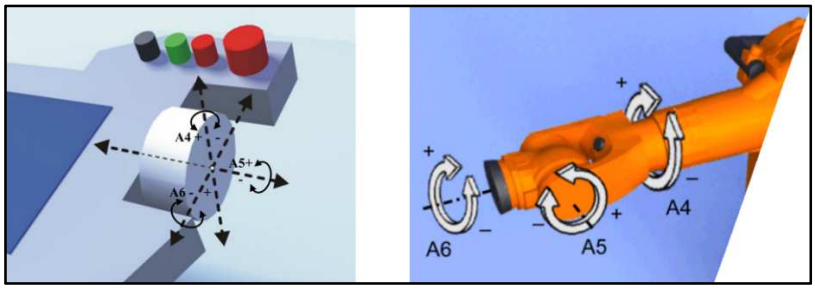


Fig. 7. Movements during rotation or tilting the 6D mouse

In the following configuration, it is possible to move all 6 axes of the robotic arm. When the rectangular coordinate system is set, pushing and pulling the Space-Mouse along their X, Y or Z axis causes a corresponding movement of the robotic arm along the X, Y or Z axis of the set reference coordinate system [13]. Rotation of the element about the X, Y or Z axes also causes the corresponding rotation of the tool about the X, Y or Z axis, figure 8.

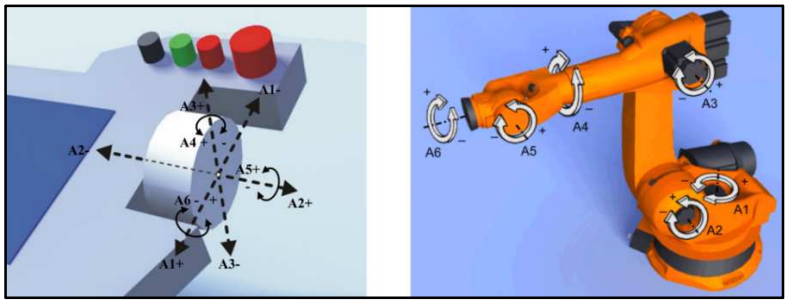


Fig. 8. Unlimited functionality of the 6D mouse element

Conclusions. Current trends in the field of control and programming of industrial robotic arms in automated operations are focused on remote mobile control via the cloud [14]. The industrial robotic arm is controlled by a PLC stored in the cloud space. This trend is proving to be one of the possibilities for the implementation of the upcoming digitization of industrial processes, the ultimate goal of which is to achieve „smart factories“. The way to get to this vision is definitely advanced image processing with "machine vision" technology for maximum flexibility and efficiency within the automated assurance of process continuity and quality [15]. A common and fundamental principle is the advanced cooperation of sensor systems in order to share their status and collect data for manufacturers. This process makes it possible to exchange information independently, to manage and to cooperate with each other between the various levels of management systems.

Acknowledgement. This work has been supported by the Slovak Grant VEGA 1/0330/19 - Research and design of algorithms and systems for the fusion of heterogeneous data in multi-sensor architectures.

References

1. Consiglio, S., G. Seliger, N. Weinert. (2007). Development of Hybrid Assembly Workplaces. In: *CIRP Annals*, Volume 56, Issue 1, 2007, Pages 37-40, ISSN 0007-8506.

2. Vagaš, M., Šimšík, D., Onofrejová, D. (2019). Factors for successfully implementation of automated solutions based on industry 4.0. In: *ARTEP 2019, Automatizácia a riadenie v teórii a praxi.* 13. ročník konferencie odborníkov z univerzít, vysokých škôl a praxe. Košice: Technická univerzita v Košiciach, s. 1-8. ISBN 978-80-553-3250-5.

3. J. Krüger, T.K. Lien, A. Verl. (2009). Cooperation of human and machines in assembly lines. In: *CIRP Annals*, Volume 58, Issue 2, Pages 628-646, ISSN 0007-8506. https://www.plm.automation.siemens.com/global/en.

4. Senderská K. (2002). Inovačné metódy a techniky a ich uplatnenie v procese projektovania montážnych systémov. In: *Transfer inovácií 5/2002*. Košice: TU, SjF, č.5/2002, s. 124-126. ISBN 8070999527.

5. Semjon et. al. (2018). Comparison of the delta robot ABB IRB 360 properties after collisions. In: *Communications - Scientific Letters of the University of Zilina*. Vol. 20, no. 1, p. 42-46. ISSN 1335-4205.

6. Vagaš, M., Semjon, J., Hajduk, M. (2016). Realisation of experimental cooperative workplace for assembly tasks. In: *Advances in Robot Design and Intelligent Control*. Zurich: Springer, P. 361-369. ISBN 978-3-319-49057-1.

7. Kuka Roboter GmbH. *Operating and Programming Instructions for System Integrators*, Kuka System software 8.3, 14.1. 2015, Version: KSS 8.3 Si V4. 2015.

8. Björn M.. ISO/TS 15066 - Collaborative Robots – Present status. In*.: Conference-European Robotics Forum*, 2015, Vienna, Austria. ISBN 978-1-8578-4776-3/02.

9. Vagaš, M. (2015): Increasing of operational safety robotized workplaces by sensor equipment, *Global management and economics*, No. 1, p.158-162, 2015.

10. Shigang Yue, S.K. Tso, W.L. Xu. (2001): Maximum-dynamic-payload trajectory for flexible robot manipulators with kinematic redundancy, *Mechanism and Machine Theory*, Volume 36, Issue 6, Pages 785-800, ISSN 0094-114X.

11. Popovič, R., Trebuňa, P., Kliment, M., Pekarčíková, M. (2015): Simulation as a part of business process modeling. In: *Acta Simulatio – International scientific journal about simulation*. Volume 1, Pages 13-16. ISSN: 1339 9640.

12. Panagiota T., Matthaiakis A., Makris, S., Chryssolouris, G. (2017).On a human-robot collaboration in an assembly cell. In.: *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. Vol. 30, No. 6, 580–589. ISSN 0951-192X.

13. Marvel, J., Norcross, R.: Implementing Speed and Separation Monitoring in Collaborative Robot Workcells. In: Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Journal. Vol.44, Pages: 144-155. ISSN 0736-5845.

14. Nokata, M., Ikuta, K., Ishii, H. Safety-optimizing method of Human-care Robot Design and Control. (2002) In.: *Proceedings of the 2002 IEEE, International conference on robotics and automation*, USA, ISBN 0-7803-7272-7/02.

15. Makris, S., Tsarouchi, P., Surdilovic, D., Krüger, J. (2014): Intuitive dual arm robot programming for assembly operations, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Volume 63, 2014, Issue 1, Pages 13–16. ISSN: 0007-8506.

УДК 621.941-229.3:621.822.172

Марек Вагаш, Ярослав Семінський

ДЕЯКІ АСПЕКТИ ТА СПЕЦИФІКИ ПРОГРАМУВАННЯ РУК РОБОТІВ НА АВТОМАТИЗОВАНИХ РОБОЧИХ МІСЦЯХ

Актуальність теми дослідження. *Важливо відзначити інноваційні елементи в галузі програмування роботизованої руки. Водночас ми хочемо надати інструкцію, як працювати з цими елементами далі і впровадити ці принципи в систему керування автоматизованими робочими місцями.*

Постановка проблеми. *Надання деякої форми інструкції, як працювати з інноваційними елементами для програмування роботизованої руки.*

Аналіз останніх досліджень і публікацій. *Нині на ринку автоматизації вже є багато інноваційних і зручних для користування пристроїв програмування. Отже, необхідно ознайомити професійну громадськість із новими можливостями програмування роботизованої руки.*

Виділення недосліджених раніше частин загальної проблеми. *Керівництво користувача від виробника є найчастіше використовуваним у цій сфері, але воно недостатньо описує деякі аспекти програмування роботизованої руки. Тому ми вважаємо за необхідне зайнятися цим питанням.*

Постановка завдання. *Надання інструкцію, як працювати зі спеціальним обладнанням, наприклад, із блоком програмування (підвісним пристроєм).*

Виклад основного матеріалу. *Для реалізації розширених функцій програмування добре мати відповідний матеріал, як вирішувати послідовність шляхів і процес автоматизації на робочому місці.*

Висновки відповідно до статті. *Опублікована стаття надає вибрані аспекти програмування роботизованої руки з акцентом на спеціальності виробників роботизованих рук. Представлена стаття надає більш детальний огляд деяких детальних рішень щодо програмування роботизованих рук, які нечасто і недостатньо описані в керівництві виробників.*

Ключові слова: *автоматизація; роботизована рука; роботизоване програмування.*

Рис.: 8. Бібл.: 15.

Vagas Marek - Doctor of Technical Sciences, associate professor, Technical University of Kosice, Faculty of Mechanical Engineering, Department of automation and human machine interactions (9 Letna Str., 041 00 Kosice, Slovakia).
E-mail: marek.vagas@tuke.sk
Scopus Author ID: 55014596100

Jaroslav Šeminský – Doctor of Technical Sciences, associate professor, Technical University of Kosice, Faculty of Mechanical Engineering, Department of automation and human machine interactions (9 Letna Str., 041 00 Kosice, Slovakia).
E-mail: jaroslav.seminsky@tuke.sk
Scopus Author ID: 35933017800

Vagaš, M., Šeminský, Ja. (2020). Selected aspects and specifics of the robotic arm programming at automated workplaces. *Technical sciences and technologies*, *3*(21), pp. 203-208.

УДК 004
DOI: 10.25140/2411-5363-2020-3(21)-209-219

Олександр Гордєєв, Костянтин Леонтієв

МОДЕЛЬ СЦЕНАРІЮ ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Актуальність теми дослідження. *Оцінювання якості програмного забезпечення (ПЗ) є обов'язковим процесом при забезпеченні необхідної якості ПЗ у межах загального процесу його розробки. Постійний розвиток наявних і поява нових інформаційних технологій (штучний інтелект, хмарні обчислення, віртуальна й доповнена реальність тощо) і систем підвищує вимоги до процесу оцінювання та забезпечення якості ПЗ.*

Постановка проблеми. *Існуючі підходи до оцінювання якості мають суттєві недоліки, які пов'язані зі слабкою формалізацією при плануванні завдань оцінювання якості ПЗ, високим ступенем невизначеності при прийнятті рішення відповідальними учасниками процесу, недостатністю або надмірністю інформації, визначенням кількості учасників процесу оцінювання ПЗ.*

Аналіз останніх досліджень і публікацій. *Були розглянуті останні публікації, що знаходяться у відкритому доступі, у яких розглядається сценарний підхід у загальному вигляді й у частині оцінювання окремих завдань якості програмного забезпечення.*

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. *Опис сценарного підходу для задач оцінювання якості програмного забезпечення.*

Постановка завдання. *Більш формалізоване представлення сценарного підходу для вирішення задач оцінювання якості ПЗ не розглядалося. Метою статті є розробка моделі сценарію оцінювання якості програмного забезпечення.*

Виклад основного матеріалу. *У статті пропонується представлення й опис моделі сценарію оцінювання якості ПЗ, яка складається з 6 наступних елементів: початкових умов, вхідних даних, дій, перехідних даних, ролей і результатів. Було встановлено, що протягом свого життєвого циклу сценарій може перебувати в наступних станах: сценарій на папері, пілотний сценарій і реальний сценарій. При переході в кожен стан множини елементів сценарію можуть змінюватися. Для формалізації таких змін були введені й формально описані додаткові операції над сценарієм: операція виключення та операція включення. Розглянуто варіанти нерівностей множин елементів сценарію для сценарію на папері й пілотного сценарію.*

Висновки відповідно до статті*. Представлена модель сценарію оцінювання якості програмного забезпечення може застосовуватися при оцінюванні якості ПЗ на основі засіву дефектів.*

Ключові слова*: сценарний підхід; модель сценарію; якість ПЗ; оцінювання якості ПЗ; засів дефектів ПЗ.*
Рис.: 2. Табл.: 1. Бібл.: 16.

Актуальність теми дослідження. Оцінювання якості програмного забезпечення (ПЗ) є обов'язковим процесом при забезпеченні необхідної якості ПЗ у межах загального процесу його розробки. Постійний розвиток існуючих і поява нових інформаційних технологій (штучний інтелект, хмарні обчислення, віртуальна і доповнена реальність тощо) і систем підвищує вимоги до процесу оцінювання та забезпечення якості ПЗ загалом.

Постановка проблеми. Така еволюція серед існуючих підходів і парадигм оцінювання якості ПЗ має недостатню динаміку, оскільки мають місце недоліки, серед яких слабка формалізація при плануванні завдань оцінювання якості ПЗ, високий ступінь невизначеності при прийнятті рішення відповідальними учасниками процесу, недостатність або надмірність необхідної початкової інформації, формування групи учасників процесу оцінювання якості ПЗ. Особливо такі проблеми явно виражені в методах оцінювання якості ПЗ, заснованих на засіві дефектів ПЗ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Одним із відомих підходів, який може до необхідного рівня формалізувати процес оцінювання якості ПЗ, є сценарний підхід. Відомі роботи, присвячені організації і формалізації процесу оцінювання якості ПЗ, описують окремі випадки в частині розвитку процесу оцінювання якості ПЗ [1-3], а сценарний підхід описується частково, на рівні деяких елементів [4-6]. Хоча існують роботи, присвячені сценарному підходу, але він розглядається в загальному вигляді як підхід до управління [7-10], без урахування особливостей оцінювання якості ПЗ загалом. Сценарний підхід концептуально не розглядається в роботах, присвячених оцінюванню якості ПЗ на основі засіву дефектів ПЗ [11; 12].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Оскільки в існуючих роботах, які були проаналізовані в повному обсязі, не описується сценарний підхід до оцінювання якості програмного забезпечення, існує необхідність його формалізованого представлення.

© Гордєєв О. О., Леонтієв К. П., 2020

Метою статті є розробка моделі сценарію оцінювання якості програмного забезпечення.

Виклад основного матеріалу.

Модель сценарію оцінювання якості програмного забезпечення. Поняття сценарію. Представимо і формально опишемо сценарієорієнтований підхід до оцінки якості ПЗ. Насамперед розглянемо поняття сценарію. Слово «сценарій» походить від латинського слова «*scaena*», яке перекладається як «сцена». Спочатку сценарій розглядався як літературно-драматичний твір, написаний як основа для постановки кіно- або телефільму, і інших заходів в театрі та інших місцях. У XX столітті провідний аналітик корпорації RAND Герман Кан (Herman Kahn) [13] адаптував цей термін для використання при написанні можливих історій розвитку подій у майбутньому. Олівер Сперроу (Oliver Sparrow), один з основоположників сценарного підходу в корпорації «Royal Dutch Shell», виділяє чотири сучасні трактування цього терміна [14]: «аналіз чутливості» в таких сферах як управління фінансовими потоками, оцінювання ризиків, менеджмент проєктів; синонім поняття «надзвичайний план» в військовому чи цивільному плануванні позаштатних ситуацій, визначаючи, хто і що повинен робити в разі виникнення нештатної ситуації; синонім «надзвичайного плану» в корпоративній або державній політиці; у розумінні «логічно узгоджене припущення про майбутнє» при прийнятті рішень і формуванні стратегії.

Усі основні визначення узагальнюються голландським ученим Філіпом Ван Ноттеном (Philip Van Notten) в [15] таке визначення: сценарій – це послідовний опис альтернативних гіпотетично можливих варіантів розвитку подій в майбутньому, який відображає різні погляди на минуле, сьогодення та майбутнє, а також який може бути базисом для планування дій.

Формалізоване представлення моделі. Адаптувавши представлене визначення сценарію для оцінювання якості програмного забезпечення, отримаємо таке трактування: сценарій оцінювання якості ПЗ – це продукт планування та опису (безперервної) послідовності дій, спрямованих на оцінювання якості програмного забезпечення, який включає опис початкових умов, вхідних даних, очікуваного результату (гіпотези) і розподіл ролей учасників процесу оцінювання якості ПЗ. Серед ролей учасників процесу можна виділити такі: організатор (інженер-дослідник) процесу оцінювання якості ПЗ (розробник сценарію), керівник групи тестування ПЗ (керівник групи якості), тестувальник (інженер з якості), користувач. Таким чином, сценарій оцінювання якості програмного забезпечення включає 6 таких елементів: дії, перехідні дані, які передаються від етапу до етапу, ролі, вхідні дані, початкові умови, очікуваний результат або гіпотеза. Представимо в загальному вигляді – графічному (рис. 1) і формальному вигляді елементи сценарію:

– $INCONSCE = \{inconsce_k\}_{k=1}^{p}$ – множина початкових умов сценарію оцінювання якості програмного забезпечення (*INCONSCE* – Initial Conditions of Scenario), *inconsce* – початкова умова сценарію оцінювання якості програмного забезпечення;

– $INDASCE = \{indasce_j\}_{j=1}^{f}$ – множина вхідних даних сценарію оцінювання якості програмного забезпечення (*INDASCE* – Input Data of Scenario), *indasce* – вхідні дані сценарію оцінювання якості програмного забезпечення;

– $ACTSCE = \langle actsce_i \rangle_{i=1}^{q}$ – множина дій сценарію оцінювання якості програмного забезпечення (*ACTSCE* – Actions of Scenario), *actsce* – дія сценарію оцінювання якості програмного забезпечення;

– $TRANDAT = \{trandat_l\}_{l=1}^{d}$ – множина перехідних даних, які передаються від дії до дії, тобто вихідні дані переходять і стають вхідними даними для наступної дії (*TRANDAT* – TRANsition DATa), *actsce* – дія сценарію оцінювання якості програмного забезпечення;

– $ROLSCE = \{rolsce_n\}_{n=1}^{t}$ – множина ролей для сценарію оцінювання якості програмного забезпечення (*ROLSCE* – Roles of Scenario), *rolsce* – роль для сценарію оцінювання якості програмного забезпечення;

– $RESSCE = \{ressce_m\}_{m=1}^{v}$ – множина результатів сценарію оцінювання якості програмного забезпечення (*RESSCE* – Results of Scenario), *ressce* – результат сценарію оцінювання якості програмного забезпечення.

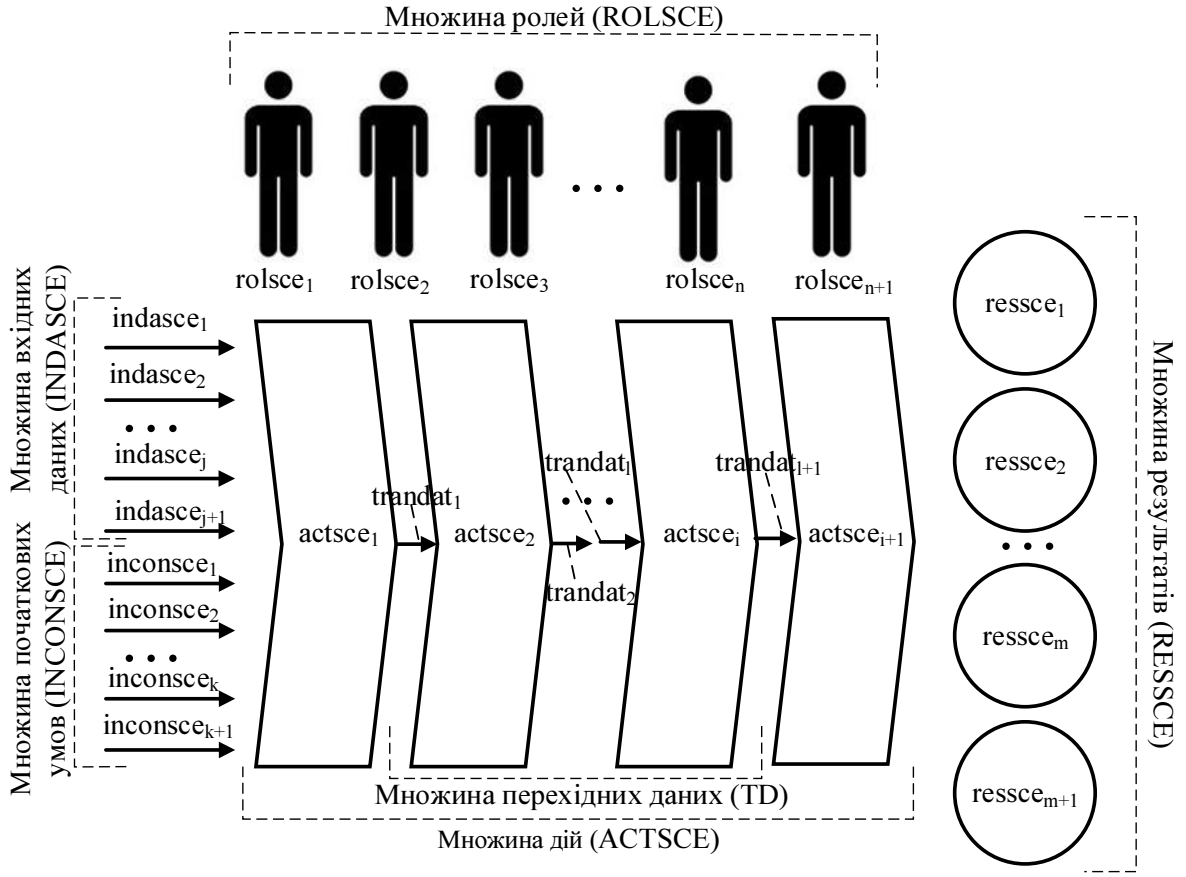


Рис. 1. Графічне представлення моделі сценарію оцінювання якості програмного забезпечення

Таким чином, сценарій оцінювання якості програмного забезпечення (*SAQSW* – Scenario of Assessment of Quality of Software) описується як множина множин (1):

$$SAQSW = \begin{Bmatrix} INCONCE, INDASCE, ACTSCE, \\ TRANDAT, ROLSCE, RESSCE \end{Bmatrix} \quad (1)$$

Дослідним шляхом було встановлено, що сценарій протягом свого життєвого циклу (рис. 2) еволюціонує і представляється в трьох наступних станах:

– сценарій на папері (*SPAQSW* – Scenario on Paper of Assessment of Quality of Software). Це перший стан сценарію, який розробляється організатором процесу оцінювання. Для позначення такого стану сценарію для кожної множини додано індекс «S» (2)

$$SPAQSW = \begin{Bmatrix} INCONCE_S, INDASCE_S, ACTSCE_S, \\ TRANDAT_S, ROLSCE_S, RESSCE_S \end{Bmatrix}; \quad (2)$$

– пілотний сценарій (*PSAQSW* – Pilot Scenario of Assessment of Quality of Software). Це сценарій на папері, який виконується в тестовому режимі. Такий сценарій необхідний, щоб відпрацювати й уточнити сценарій на реальному тестовому прикладі. Переважно кількість учасників, які залучені в сценарій, є мінімальною. Зазвичай такий сценарій відрізняється від сценарію на папері за рахунок уточнення елементів сценарію. Для позначення такого стану сценарію для кожної множини додано індекс «P» (3)

$$PSAQSW = \begin{Bmatrix} INCONCE_P, INDASCE_P, ACTSCE_P, \\ TRANDAT_P, ROLSCE_P, RESSCE_P \end{Bmatrix}; \quad (3)$$

– реальний сценарій (RSAQSW – Real Scenario of Assessment of Quality of Software). Такий стан сценарію використовується для оцінювання якості ПЗ для реального об'єкта дослідження. Здебільшого може відрізнятися від пілотного сценарію, за рахунок уточнень, які вносяться в нього в процесі виконання. Для позначення такого варіанта сценарію для кожної множини додано індекс «R» (4).

$$RSAQSW = \begin{Bmatrix} INCONCE_R, INDASCE_R, ACTSCE_R, \\ TRANDAT_R, ROLSCE_R, RESSCE_R \end{Bmatrix}. \quad (4)$$

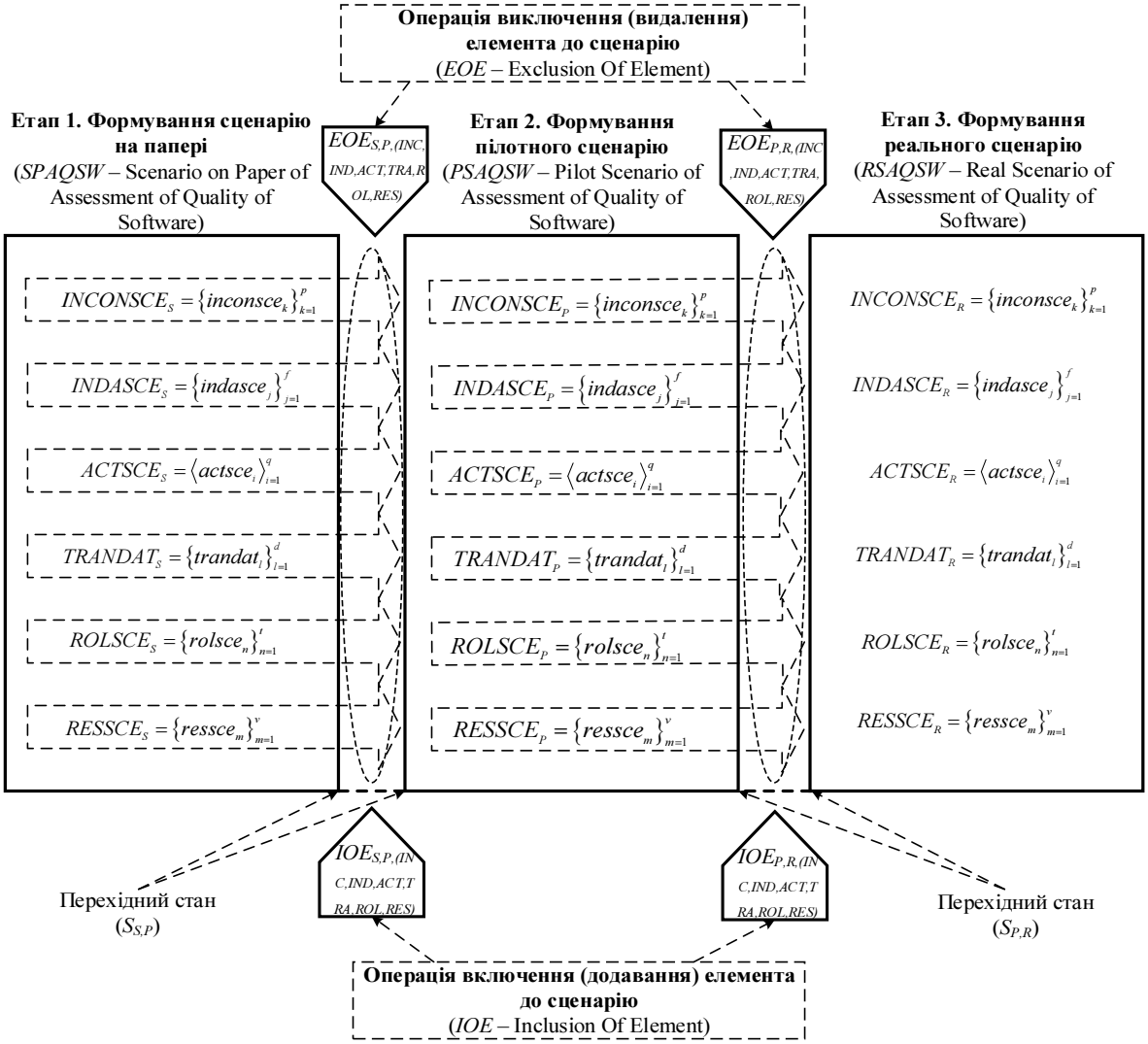


Рис. 2. Життєвий цикл сценарію оцінювання якості програмного забезпечення

Таким чином уточнимо загальний запис для сценарію оцінювання якості програмного забезпечення з урахуванням стану сценарію і додамо для кожної множини індекс VOS, який позначає стан сценарію (*VOS* – Variant Of Scenario). Отже, індекс VOS може набувати таких значень: S – *SPAQSW* – Scenario on Paper of Assessment of Quality of Software, P – *PSAQSW* – Pilot Scenario of Assessment of Quality of Software, R – *RSAQSW* – Real Scenario of Assessment of Quality of Software) (5):

$$SAQSW = \begin{Bmatrix} INCONCE_{VOS}, INDASCE_{VOS}, ACTSCE_{VOS}, \\ TRANDAT_{VOS}, ROLSCE_{VOS}, RESSCE_{VOS} \end{Bmatrix}. \quad (5)$$

Операції над сценарієм. Протягом свого життєвого циклу сценарій може уточнюватися, тобто видозмінюватися. У статті не розглядаються та не аналізуються приклади та причини, у яких випадках може змінюватися сценарій, оскільки такий матеріал вимагає більшого обсягу та може претендувати на окрему статтю. Було встановлено, що такі зміни зводяться до двох таких операцій над елементами сценарію:

– виключення (видалення) елемента сценарію ($EOE_{VOS,VOS,TEOS}$ – Exclusion Of Element);

– включення (додавання) елемента сценарію ($IOE_{VOS,VOS,TEOS}$ – Inclusion Of Element).

Можлива також операція перетворення елементів сценарію, але вона не розглядається, оскільки може бути представлена парою операцій виключення і включення. При введенні додаткових множин для кожної з них був доданий індекс *TEOS*, який позначає варіант сценарію (*TEOS* – Type of Elements Of Scenario). Таким чином, індекс *TEOS* може набувати таких значень: *INC* – *INCONSCE* – Initial Conditions of Scenario, *IND* – *INDASCE* – Input Data of Scenario, *ACT* – *ACTSCE* – Actions of Scenario, *TRA* – *TRANDAT* – TRANsition DATa, *ROL* – *ROLSCE* – Roles of Scenario, *RES* – *RESSCE* – Results of Scenario).

Для більш формального опису таких змін сценарію введемо додаткове позначення – $S_{VOS,VOS}$, яке може бути двох видів: $S_{S,P}$ – перехідний стан сценарію на папері в пілотний сценарій, $S_{P,R}$ – перехідний стан пілотного сценарію в реальний сценарій. Розглянемо можливі варіанти нерівностей сценаріїв та їхніх елементів для перехідних станів (рис. 2).

Формально представимо опис операцій виключення ($EOE_{VOS,VOS,TEOS}$) і включення ($IOE_{VOS,VOS,TEOS}$). Для цього необхідно ввести додаткові наступні множини:

– множина початкових елементів з відповідної множини (SOE_{TEOS} – Set of Original Elements). Така множина включає всі елементи початкового сценарію, для якого буде застосовуватися відповідна операція;

– множина елементів, що виключаються з відповідної множини ($SEXE_{TEOS}$ – Set of Excluding Elements). Оскільки при використанні операції виключення може видалятися тільки один елемент із множини початкових елементів сценарію, то така множина включатиме один елемент, хоча такі елементи в множині можуть накопичуватися при багаторазовому використанні операції виключення для початкового сценарію;

– множина виключених елементів з відповідної множини (SEE_{TEOS} – Set of Excluded Elements). Оскільки при використанні операції виключення може видалятися тільки один елемент з множини початкових елементів сценарію, то така множина буде складатися з одного елементу, хоча такі елементи в множині можуть накопичуватися при багаторазовому використанні операції виключення для початкового сценарію. Тобто елемент сценарію при використанні операції виключення переходить з множини елементів, що виключаються, у множину виключених елементів;

– множина результуючих елементів з відповідної множини (SRE_{TEOS} – Set of Resulting Elements). Така множина формується як різниця між множиною початкових елементів і множиною елементів сценарію, що виключаються, або ж як сума множини початкових елементів і множини елементів, що включаються;

– множина елементів, що включаються, з відповідної множини (SIE_{TEOS} – Set of Included Elements). Це множина, яка включає в себе елемент або елементи, які будуть додані в множину початкових елементів, і таке об'єднання множин формує результуючу множину елементів сценарію.

У загальному вигляді операція виключення (видалення) елемента ($EOE_{VOS,VOS,TEOS}$) для кожного стану сценарію записується в такий спосіб (6):

$$EOE_{VOS,VOS,TEOS} = \begin{Bmatrix} SRE_{TEOS} = SOE_{TEOS} \setminus SEXE_{TEOS} \\ SEE_{TEOS} = SOE_{TEOS} \cap SEXE_{TEOS} \\ SIE_{TEOS} = \varnothing \end{Bmatrix}, \quad (6)$$

а операція включення (додавання) елемента ($IOE_{VOS,VOS,TEOS}$) для кожного стану сценарію таким чином (7):

$$IOE_{VOS,VOS,TEOS} = \begin{Bmatrix} SRE_{TEOS} = SOE_{TEOS} \cup SIE_{TEOS} \\ SOE_{TEOS} \cap SIE_{TEOS} = \varnothing \\ SEE_{TEOS} = SEXE_{TEOS} = \varnothing \end{Bmatrix}. \quad (7)$$

Життєвий цикл сценарію оцінювання якості програмного забезпечення включає 3 етапи, які відповідають його трьом станам (див. рис. 2):

1. Етап формування сценарію на папері;
2. Етап формування пілотного сценарію;
3. Етап формування реального сценарію.

Такі етапи формування сценарію оцінювання якості програмного забезпечення можуть виконуватися тільки послідовно. На початку – етап формування сценарію на папері, далі пілотного та реального сценаріїв.

Переходячи від етапу до етапу, протягом свого життєвого циклу сценарій оцінювання якості програмного забезпечення може зазнавати певних змін. Такі зміни є наслідком застосування операцій виключення і (або) включення елементів сценарію.

Для перехідного стану $S_{S,P}$ існують наступні два варіанти нерівностей:

– сценарій на папері не дорівнює пілотному сценарію, тобто $SPAQSW \neq PSAQSW$.

Якщо розглядати таку нерівність на рівні елементів, то можливі варіанти рівності і нерівності таких елементів. Розглянемо варіанти нерівностей на рівні елементів сценарію на папері і пілотного сценарію і представимо їх у вигляді повного простого перебору, виключаючи варіант повної рівності (див. табл.). Для прикладу один такий варіант нерівностей (таблиця, рядок 22) розпишемо більш детально. Такий варіант складається з таких співвідношень: $INCONCE_s \neq INCONCE_p$, $INDASCE_S = INDASCE_P$, $ACTSCE_s \neq ACTSCE_p$, $TRANDT_S = TRANDT_P$, $ROLSCE_S \neq ROLSCE_P$, $RESSCE_S = RESSCE_P$. Оскільки серед нерівностей є і рівності, які вказують на ідентичність елементів, будемо розглядати і описувати тільки наступні нерівності: $INCONCE_s \neq INCONCE_p$, $ACTSCE_s \neq ACTSCE_p$, $ROLSCE_s \neq ROLSCE_p$. Оскільки нерівності сценаріїв свідчать про використання операції включення або виключення опишемо більш детально такі нерівності для обох операцій:

– якщо застосували операцію виключення для елементів множини початкових умов, дій і ролей для сценарію (8-10):

$$EOE_{S,P,INC} = \begin{Bmatrix} SOE_{INC} = INCONCE_S \\ SRE_{INC} = SOE_{INC} \setminus SEXE_{INC} = INCONCE_P \\ SEE_{INC} = SOE_{INC} \cap SEXE_{INC} \\ SIE_{INC} = \varnothing \end{Bmatrix}, \quad (8)$$

Таблиця

Варіанти нерівностей множин елементів для сценарію на папері і пілотного сценарію

№	$INCONCE_{S(P)}$, $INCONCE_{P(R)}$	$INDASCE_{S(P)}$, $INDASCE_{P(R)}$	$ACTSCE_{S(P)}$, $ACTSCE_{P(R)}$	$TRANDAT_{S(P)}$, $TRANDAT_{P(R)}$	$ROLSCE_{S(P)}$, $ROLSCE_{P(R)}$	$RESSCE_{S(P)}$, $RESSCE_{P(R)}$
1	2	3	4	5	6	7
1.	≠	≠	≠	≠	≠	≠
2.	≠	≠	≠	≠	≠	=
3.	≠	≠	≠	≠	=	≠
4.	≠	≠	≠	≠	=	=
5.	≠	≠	≠	=	≠	≠
6.	≠	≠	≠	=	≠	=
7.	≠	≠	≠	=	=	≠
8.	≠	≠	≠	=	=	=
9.	≠	≠	=	≠	≠	≠
10.	≠	≠	=	≠	≠	=
11.	≠	≠	=	≠	=	≠
12.	≠	≠	=	≠	=	=
13.	≠	≠	=	=	≠	≠
14.	≠	≠	=	=	≠	=
15.	≠	≠	=	=	=	≠
16.	≠	≠	=	=	=	=
17.	≠	=	≠	≠	≠	≠
18.	≠	=	≠	≠	≠	=
19.	≠	=	≠	≠	=	≠
20.	≠	=	≠	≠	=	=
21.	≠	=	≠	=	≠	≠
22.	≠	=	≠	=	≠	=
23.	≠	=	≠	=	=	≠
24.	≠	=	≠	=	=	=
25.	≠	=	=	≠	≠	≠
26.	≠	=	=	≠	≠	=
27.	≠	=	=	≠	=	≠
28.	≠	=	=	≠	=	=
29.	≠	=	=	=	≠	≠
30.	≠	=	=	=	≠	=
31.	≠	=	=	=	=	≠
32.	≠	=	=	=	=	=
33.	=	≠	≠	≠	≠	≠
34.	=	≠	≠	≠	≠	=
35.	=	≠	≠	≠	=	≠
36.	=	≠	≠	≠	=	=
37.	=	≠	≠	=	≠	≠
38.	=	≠	≠	=	≠	=
39.	=	≠	≠	=	=	≠
40.	=	≠	≠	=	=	=
41.	=	≠	=	≠	≠	≠
42.	=	≠	=	≠	≠	=
43.	=	≠	=	≠	=	≠

44.	=	≠	=	≠	=	=

Закінчення табл.

1	2	3	4	5	6	7
45.	=	≠	=	=	≠	≠
46.	=	≠	=	=	≠	=
47.	=	≠	=	=	=	≠
48.	=	≠	=	=	=	=
49.	=	=	≠	≠	≠	≠
50.	=	=	≠	≠	≠	=
51.	=	=	≠	≠	=	≠
52.	=	=	≠	≠	=	=
53.	=	=	≠	=	≠	≠
54.	=	=	≠	=	≠	=
55.	=	=	≠	=	=	≠
56.	=	=	≠	=	=	=
57.	=	=	=	≠	≠	≠
58.	=	=	=	≠	≠	=
59.	=	=	=	≠	=	≠
60.	=	=	=	≠	=	=
61.	=	=	=	=	≠	≠
62.	=	=	=	=	≠	=
63.	=	=	=	=	=	≠

$$EOE_{S,P,IND} = \begin{Bmatrix} SOE_{IND} = INDASCE_S \\ SRE_{IND} = SOE_{IND} \setminus SEXE_{IND} = INDASCE_P \\ SEE_{IND} = SOE_{IND} \cap SEXE_{IND} \\ SIE_{IND} = \varnothing \end{Bmatrix}, \quad (9)$$

$$EOE_{S,P,ROL} = \begin{Bmatrix} SOE_{ROL} = ROLSCE_S \\ SRE_{ROL} = SOE_{ROL} \setminus SEXE_{ROL} = ROLSCE_P \\ SEE_{ROL} = SOE_{ROL} \cap SEXE_{ROL} \\ SIE_{ROL} = \varnothing \end{Bmatrix}; \quad (10)$$

– якщо застосували операцію включення для елементів множини початкових умов, дій і ролей для сценарію (11-13):

$$IOE_{S,P,INC} = \begin{Bmatrix} SOE_{INC} = INCONCE_S \\ SRE_{INC} = SOE_{INC} \cup SEXE_{INC} = INCONCE_P \\ SOE_{INC} \cap SIE_{INC} = \varnothing \\ SEE_{INC} = SEXE_{INC} = \varnothing \\ SIE_{INC} = \varnothing \end{Bmatrix}, \quad (11)$$

$$IOE_{S,P,IND} = \begin{Bmatrix} SOE_{IND} = INDASCE_S \\ SRE_{IND} = SOE_{IND} \cup SEXE_{IND} = INDASCE_P \\ SOE_{IND} \cap SIE_{IND} = \varnothing \\ SEE_{IND} = SEXE_{IND} = \varnothing \\ SIE_{IND} = \varnothing \end{Bmatrix}, \quad (12)$$

$$IOE_{S,P,ROL} = \begin{Bmatrix} SOE_{ROL} = ROLSCE_S \\ SRE_{ROL} = SOE_{ROL} \cup SEXE_{ROL} = ROLSCE_P \\ SOE_{ROL} \cap SIE_{ROL} = \varnothing \\ SEE_{ROL} = SEXE_{ROL} = \varnothing \\ SIE_{ROL} = \varnothing \end{Bmatrix}. \quad (13)$$

– сценарій на папері ідентичний пілотному сценарію, тобто $SPAQSW = PSAQSW$.

Таким чином кожній множині сценарію на папері відповідає еквівалентна множина пілотного сценарію, тобто $INCONSCE_S = INCONSCE_P$, $INDASCE_S = INDASCE_P$, $ACTSCE_S = ACTSCE_P$, $TRANDAT_S = TRANDAT_P$, $ROLSCE_S = ROLSCE_P$.

Для перехідного стану $S_{P,R}$ існують наступні два варіанти нерівностей:

1. Пілотний сценарій не дорівнює реальному сценарію, тобто $PSAQSW \neq RSAQSW$.

Така нерівність в частині множини варіантів на рівні елементів сценарію аналогічна нерівності сценарію на папері й пілотного сценарію з урахуванням того, що як коефіцієнти при елементах сценарію розглядаються коефіцієнти в круглих дужках, тобто замість індексу «S» розглядається індекс «P», а замість індексу «P» розглядається індекс «R» (див. табл.).

2. Пілотний сценарій ідентичний реальному сценарію, тобто $PSAQSW = RSAQSW$.

Таким чином кожна з множин елементів одного сценарію дорівнює відповідній множині іншого сценарію, тобто $INCONSCE_P = INCONSCE_R$, $INDASCE_P = INDASCE_R$, $ACTSCE_P = ACTSCE_R$, $TRANDAT_P = TRANDAT_R$, $ROLSCE_P = ROLSCE_R$.

Застосування моделі. Запропонована модель може бути використана для оцінювання якості програмного забезпечення з використанням засіву дефектів ПЗ. Зокрема, при розробці та реалізації процедур засіву дефектів (Fault Injection Testing, FIT), які використовуються в Науково-виробничому підприємстві «Радій», застосовуються різні сценарії засіву для оцінки функціональної безпеки FPGA проєктів для локальних інформаційно-керуючих систем АЕС. Для виконання FIT формуються різні профілі дефектів, що засіваються в електронний проєкт, фізичний модуль, програмне забезпечення верхнього рівня, одиночних і множинних дефектів, відносних і абсолютних дефектів двоверсіонних систем аварійного захисту тощо. Таке різноманіття профілів породжує різноманіття сценаріїв FIT і сценаріїв оцінювання якості, описаних у статті.

Висновки відповідно до статті. У статті представлена і формально описана модель сценарію оцінювання якості програмного забезпечення. Її застосування дозволить формалізувати планування (початкові умови, вхідні дані, дії, перехідні дані, ролі і результати) і виконання сценарію, врахувати можливі особливості станів сценаріїв, перехід сценарію зі стану в стан з урахуванням можливих змін множин елементів сценарію.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на розробку й автоматизацію реалізації деталізованих сценаріїв оцінювання якості ПЗ і FPGA проєктів.

Список використаних джерел

1. Ratanothayanon S., Srivisal Ch., Vanichayobonand S., Preechaveerakul L. Comparative Classifiers for Software Quality Assessment. 2012. *International Journal of Engineering and Technology*. 2012. Vol. 4(4). Pp. 404–408.

2. Gordieiev O., Kharchenko V. IT-oriented software quality models and evolution of the prevailing characteristics. *In proceedings of IEEE 9th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT).* 2018. Pp. 390–395.

3. Brandtner M. Fostering software quality assessment. *In proceedings of 35th International Conference on Software Engineering (ICSE)*. 2013. Pp. 1393–1396.

4. Software quality models: purposes, usage scenarios and requirements / Deissenboeck F., Juergens E., Lochmann K. et al. *In proceedings of the ICSE Workshop on Software Quality*. 2009. Pp. 9-14.

5. Briggs Ch. M., Matejova M. Scenario Planning and Complex Scenario Approach. *Disaster Security.* 2019. Pp. 38-60.

6. Koppen P. J., Mackor A. R. A Scenario Approach to the Simonshaven Case. *Wiley Online Library. Topics in Cognitive Science.* 2019. Pp. 1–20. URL: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/tops.12429.

7. Campi M. C., Garatti S. Introduction to the Scenario Approach : book. *Society for Industrial and Applied Mathematics and the Mathematical Optimization Society.* 2018. 116 p.

8. Ramponi F. A. Consistency of the Scenario Approach. *Journal on Optimization.* 2018. Vol. 28(1). Pp. 135–162.

9. Garatti S., Campi M. C. Learning for Control: a Bayesian Scenario Approach. *In proceedings of the IEEE 58th Conference on Decision and Control (CDC).* 2019. Pp. 1772–1777.

10. Shumkov Y. A., Vidovskiy L. A. Scenario approach to project management. *Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University.* 2017. Vol. 134 (10). Pp. 1-9.

11. Soumya S., Baiju A. Software Faults Emulation by Software Fault Injection. *International Journal of Computer Applications.* 2014. Vol. 97. Pp. 9-11.

12. Cotroneo D., Madeira H. Introduction to Software Fault Injection. *Innovative Technologies for Dependable OTS-Based Critical Systems* / ed. D. Cotroneo. Springer. 2013. Pp. 1-15.

13. Kahn H. The Year 2000: A framework for speculation on the next thirty-three year. *NY: Macmillan Publishing Company*. 1967. 432 p.

14. Sparrow O. Making use of scenarios – from the vague to the concrete. *Scenario & Strategy Planning*. 2000. Vol. 2(5). Pp. 18–21.

15. Van Notten Ph. Writing on the wall: scenario development in times of discontinuity. *Florida: Boca Raton*. 2005. 209 p.

16. Kharchenko V., Gordieiev O., Vilkomir S., Odarushchenko O. T-Wise-Based Multi-Fault Injection Technique for the Verification of Safety Critical I&C Systems. *In proceedings of the 9th International Conference on Nuclear Plant Instrumentation, Control, and Human-Machine Interface Technologies (NPIC&HMIT)*. 2015. P.1-9.

References

1. Ratanothayanon, S., Srivisal, Ch., Vanichayobonand, S., Preechaveerakul, L. (2012). Comparative Classifiers for Software Quality Assessment. *International Journal of Engineering and Technology*, 4(4), pp. 404–408.

2. Gordieiev, O., Kharchenko, V. (2018). IT-oriented software quality models and evolution of the prevailing characteristics. In *proceedings of IEEE 9th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT'2018)* (pp. 390–395).

3. Brandtner, M. (2013) Fostering software quality assessment. *In proceedings of 35th International Conference on Software Engineering (ICSE'2013)*. (pp. 1393–1396).

4. Deissenboeck, F., Juergens, E., Lochmann, K., et al. (2009). Software quality models: purposes, usage scenarios and requirements. *In proceedings of the ICSE Workshop on Software Quality* (pp. 9–14).

5. Briggs, Ch. M., Matejova, M. (2019). Scenario Planning and Complex Scenario Approach. *Disaster Security* (pp. 38–60).

6. Koppen, P. J., Mackor, A. R. (2019). A Scenario Approach to the Simonshaven Case. *Wiley Online Library. Topics in Cognitive Science* (pp. 1–20). https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/tops.12429.

7. Campi, M. C., Garatti, S. (2018). *Introduction to the Scenario Approach* : book. Society for Industrial and Applied Mathematics and the Mathematical Optimization Society. 116 p.

8. Ramponi, F. A. (2018). Consistency of the Scenario Approach. *Journal on Optimization,* 28(1), pp. 135–162.

9. Garatti, S., Campi, M. C. (2019). Learning for Control: a Bayesian Scenario Approach. *In proceedings of the IEEE 58th Conference on Decision and Control (CDC'2019).* (pp. 1772–1777).

10. Shumkov, Y. A., Vidovskiy, L. A. (2017). Scenario approach to project management. *Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University,* 34 (10), pp. 1–9.

11. Soumya, S., Baiju, A. (2014). Software Faults Emulation by Software Fault Injection. *International Journal of Computer Applications,* 97, pp. 9–11.

12. Cotroneo, D., Madeira, H. (2013). Introduction to Software Fault Injection. *Innovative Technologies for Dependable OTS-Based Critical Systems* / ed. D. Cotroneo. Springer (pp. 1–15).

13. Kahn, H. (1967). *The Year 2000: A framework for speculation on the next thirty-three year*. Macmillan Publishing Company.

14. Sparrow, O. (2000). Making use of scenarios – from the vague to the concrete. *Scenario & Strategy Planning*, 2(5), pp. 18–21.

15. Van Notten, Ph. (2005). *Writing on the wall: scenario development in times of discontinuity.* Florida: Boca Raton.

16. Kharchenko, V., Gordieiev, O., Vilkomir, S., Odarushchenko, O. (2015). T-Wise-Based Multi-Fault Injection Technique for the Verification of Safety Critical I&C Systems. *In proceedings of the 9th International Conference on Nuclear Plant Instrumentation, Control, and Human-Machine Interface Technologies (NPIC&HMIT'2015)*)(pp. 1–9).

UDC 004

Oleksandr Gordieiev, Konstantin Leontiev

SOFTWARE QUALITY ASSESSMENT SCENARIO MODEL

Urgency of the research. *Assessment of the software quality is a mandatory process to ensure the required quality of software within the overall software development process. The constant development of existing and the emergence of new information technologies (artificial intelligence, cloud computing, virtual and augmented reality, etc.) and systems increases the requirements for the evaluation process and software quality assurance.*

Target setting. *Existing approaches to quality assessment have significant problems associated with weak formalization in planning software quality assessment tasks, a high degree of uncertainty in decision making by the responsible participants in the process, insufficient or redundant information, and determining the number of participants in the software assessment process.*

Actual scientific researches and issues analysis. *Recent publications in open access, which consider the scenario approach in general and in relation to the tasks of assessing the quality of software, were analyzed.*

Uninvestigated parts of general matters defining. *Description of the scenario approach for software quality assessment tasks.*

The research objective. *A more formalized presentation of the scenario approach for solving tasks of software quality assessment has not been considered. The purpose of the article is to develop a model of the software quality assessment scenario.*

The statement of basic materials. *The article proposes a representation and description of the software quality assessment scenario model, which consists of the following 6 elements: initial conditions, input data, actions, transition data, roles and results. It has been found, that during its life cycle, a scenario can be in the following states: scenario on paper, pilot scenario and real scenario. During the transition to each state, many elements of the script can change. To formalize such changes, additional operations on the script were introduced and formally described: the operation of exclusion and the operation of inclusion. Variants of set inequalities for the scenario on paper and the pilot scenario are considered.*

Conclusions. *The model of the software quality assessment scenario is presented. It can be used for software quality assessment based on the seeding of defects.*

Keywords: *scenario approach; scenario model; software quality; software quality assessment; software defects injection. Fig.: 2. Table: 1. References: 16.*

Гордєєв Олександр Олександрович – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри кібербезпеки, Університет банківської справи (вул. Андріївська, 1, м. Київ, 04070, Україна).
Gordieiev Oleksandr – PhD in Technical Sciences, Associate professor, Head of cybersecurity department, Banking university (1 Andriivska Str., 04070 Kyiv, Ukraine).
E-mail: alex.gordeyev@gmail.com

Леонтієв Костянтин Петрович – технічний директор, Науково-виробниче підприємство «Радій» (вул. Академіка Тамма, 29, г. Кропивницкий, 25009, Украина).
Leontiev Konstantin – Technical Director, Research and Production Enterprise "Radiy" (29 Akademika Tamma Str., 25009 Kropyvnytskyi, Ukraine).

Гордєєв О., Леонтієв К. Модель сценарію оцінювання якості програмного забезпечення. *Технічні науки та технології.* 2020. № 3 (21). С. 209-219.

UDC 004.94:004.92
DOI: 10.25140/2411-5363-2020-3(21)-220-228

Erik Prada, Adam Kolář

POSSIBILITIES OF CONVERT CAD MODELS FOR REAL TIME RENDERING SOFTWARE

Urgency of the research. *The proposed methods can save valuable time and cut down the cost on hardware in some instances and make it easier for a non-technical group of professionals to design and renderer products.*

Target setting. *To use free and paid products for use in modern businesses and schools to optimize the design and research phase and also create environments for training the qualified personnel in extreme conditions.*

Actual scientific researches and issues analysis*. These optimizations are done directly by developers of the real time simulation tools and some large companies but a lot of them are fractured to smaller businesses and need one direction to make it to the mainstream.*

Uninvestigated parts of general matters defining. *Conversion methodology CAD models for real time rendering.*

The research objective. *Make a uniform standard of procedures on how to leverage the power of real time rendering tools and find ways to use them in industrial practice.*

The statement of basic materials*. Possibilities of using the game engine Unreal Engine and the Epic Games addon DATASMITH for conversion CAD models for real time rendering software are presented in article*

Conclusions. *The game engines can be used with right tools to make it easier for artists and other non-technical professions to see results immediately. Also these tools can be leveraged to make simulations of various kinds with higher efficiency but the results can be less accurate. But with the development of better tools and better integration of CAD software these results can be improved and me and also other professionals believe that the future of the designing and testing products is real time.*

Keywords: *CAD model; DATASMITH; Unreal Engine; UV map; Virtual Reality.*
Fig.: 9. References: 11.

Introduction. In many industrial use cases there is a need for using different tools and applications to reach a certain goal in research and development of product or mechanical assemblies. In mechanical engineering these problems are common in industrial software. For example, if you create a CAD model in SOLIDWORKS and you need structural analysis, it might happen that particular software doesn't have the best tools for your specific use case. Then you as an engineer are forced to use other expensive software to make these analyses. This problem is encountered most commonly in the process when we need a photorealistic render of a product or we want to create a model from CAD software to use it in a game engine for real time rendering. These demands for this kind of rapid development will only rise in the near future. If we use the right tools, we can significantly cut time needed for development. Also artists now can create realistic graphics or promotional renders with photorealistic fidelity by touching a button. There were many advances in this field of real-time rendering, but we would like to highlight a particular use case, which shows what these tools in the right conditions can achieve. The Michigan based Mechanical Simulation firm uses Unreal Engine and their proprietary software CarSim thanks to which they can simulate accurate conditions for driving such as asphalt type or road slope etc. Their software is splitted to two big softwares. The solver which solves the physical problems and Unreal Engine which creates the visualization. This firm shows that these kinds of simulations are possible and useful, for example as simulating autonomous driving and using that data to improve real product. The customer of VERTechs firm were able to create virtual city where they tested their autonomous vehicles. This is just one of the many possibilities which can be done by an Unreal Engine. This article will be exploring the possibility of solving the fundamental problem which is introduced by using a game engine [1-4].

Differences between CAD simulations and real time methods. CAD software has many advantages then real time methods, but the real time tools are quickly catching up. When we think about creating a product in CAD software, for example SOLIDWORKS, we usually think about this workflow. We design the model, then define variables we want to simulate. Then we tell the software to calculate the results. We wait for the results to be calculated and then reiterate if we see structural deformations or other design flaws, and do this over and over again. CAD software makes it easier in recent years but the next evolution can be the real time rendering. When we think about real time rendering, the first thing that we see is used in the video

© Ерік Прада, Адам Коларж, 2020

game industry. And that is not a bad thing. These tools used in this particular industry are very powerful and have a lot of foundation already to be used in the professional spaces. A great example is a tool called ArchViz, in which we can transfer integrity from application that is used for building designs to a game engine and render the building in real time so that clients can walk inside a building, while this building is not even built. Now we apply this promise of high fidelity simulation to engineering. The workflow will be in the high level the same. We design the product, then we test and repeat this process. But the benefits start to show when we look closer to the parts of the process. After we have designed the product in a conventional CAD, we export it to a real-time renderer, which in our case is the Unreal Engine and in future or perfect case we have advanced tools in Unreal, thanks to which we do not need to further edit this CAD model. Then we specify what we want to start the test and we see real time results. For example, a plane crashing to the ground in real time and we can see the results of the deformation of the plane elements as soon as the plane hits the ground. Or we can pause the simulation and change for example the type of the engine in the middle of the simulation. These benefits of real time rendering can change our ways of how we approach research and development, and make these processes more straight forward [5].

The problem of the fragmentation of the software. When we worked on the project, which was focused on creating simulation software for a laic audience, we came across this problem. Being mechatronics engineers, we didn't want to learn a new software, which is specific for the game industry to model models for this use case. We are pretty familiar with CAD software, so that was a natural option. Many engineers had this same problem and EPIC games created solutions for this, but that is only a part of the solution. The other part is how we use these models. There are two ways, which will be discussed in the capitol below. But to outline the problem, we need to understand how these software works. CAD software has its own file format and the game engine uses their own standards. CAD software uses format specific for each platform, for example IGES, etc. The game software uses FBX. We needed a compatibility layer to convert these file formats and give them some other properties, which we also discuss below. The fundamental problem was the difference of file formats, but in many cases further modification of the basic design is required, but this is in the end worth the trade-offs [6, 11].

Available software and methods to convert CAD Models for real time rendering. There are many methods on how we can approach this problem. Some can produce usable results and some can produce results, that reach industrial standards. First, we need to choose the suitable render engine for our use case. If we look for commercial solutions, we have two biggest options and these are Unity and Unreal Engine. Our method was tested in Unreal Engine, because this engine has a necessary set of tools, which in our opinion are essential for this use case. If we want to render our CAD model in real time, we have two paths to export our model.

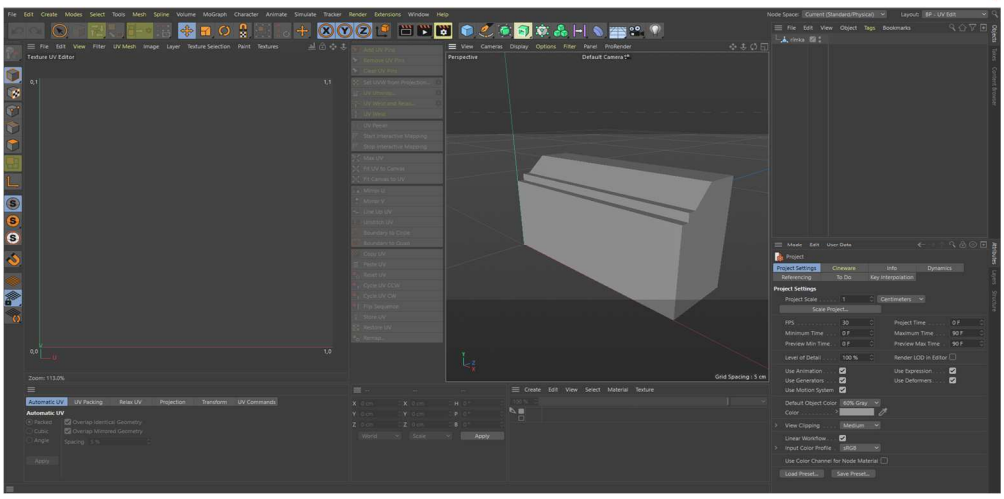


Fig. 1. STL model in Cinema 4D UV map view [6]

First path is to use the STL format for our model and then we import it to 3D editing software like Blender or Autodesk MAYA, in which we export our STL file as FBX file format. There are two significant problems with these methods. First one is UV mapping of the STL model and the second is file format itself. These problems only exist if we don't edit these models in Blender and Autodesk MAYA or Cinema 4D, and we only export them without fixing them. UV mapping is essentially telling the render engine how and on what scale the texture of the material should be applied to our model. The problem with that is that STL format is not exporting UV maps in SOLIDWORKS. You need to create it. For example, Cinema 4D can automatically create the correct UV map based on your model. Then if you export it as FBX file format and import it to the Unreal Engine and apply a material to it, it shows the material correctly, but it has some imperfections. We found that radial surfaces usually have the material blurred. Your results may vary, it all comes down to the geometry of your CAD model. The other problems are created directly from STL format and the way it handles the models. STL format is most notably used for 3D printers and the model is exported as layers, which creates all sorts of problems. Especially curved geometry is created from small triangular planes and if we want some degree of visual polishness, then we need a very large number of these planes, so the object is perfectly smooth to the human eye. That is a problem in UV maps. Because of this the UV map is far more complex than it needs to be and the editing of it becomes far more difficult. Also this creates visual inconsistencies that can be seen as blurred textures or stretched texture on the edges. To fix this problem we need to usually create a new UV map from scratch. This process is time consuming because we need not only to fix this inconstancy, but optimize the whole UV map for the large number of triangular planes. There are more methods to do this, but the best one from our results is to use the Unreal Engine plugin called DATASMITH. This method is created for the Unreal Engine model called Static mesh actor, which is commonly used in video games as FBX (filmbox) file format. FBX uses C++ and python so thanks to that this format is modular and can be used in open source editors such as Blender. This translation layer DATASMITH not only saves time, but makes models like arches or difficult geometry better, because it is created from polygons. That means game engines can render these models in high quality and thanks to next gen features like ray tracing, they can achieve high fidelity visuals and lighting. This add-on also removes the need for fixing UV maps by reducing these time consuming tasks from professional workflow. But we still may need to create UV maps, if we want to achieve professional results. Thanks to that, customers can ride a new car before it even hits the assembly line. The most notable problem is that relations between parts needs to be reapplied. That means if we for example export assembly of large 100 part assembly from SOLIDWORKS, then if we use the first method, we have the full object in the Unreal Engine. The relations between objects we need to fix and apply from the ground up. That said we can also import architecture data in the Unreal Engine and make archive simulations for clients. We found it best to apply material in the Unreal Engine, because thanks to Quixel Megascans you can create photorealistic scenes that look and feel real. If we add raytracing for lighting, then we have one of the best looking sceneries, which no CAD software can do. The best part is everything is real time rendered, so we can go to the scene and change static meshes and see the result right away. But this workflow can't completely eliminate the need for modeling software [8, 10, 11].

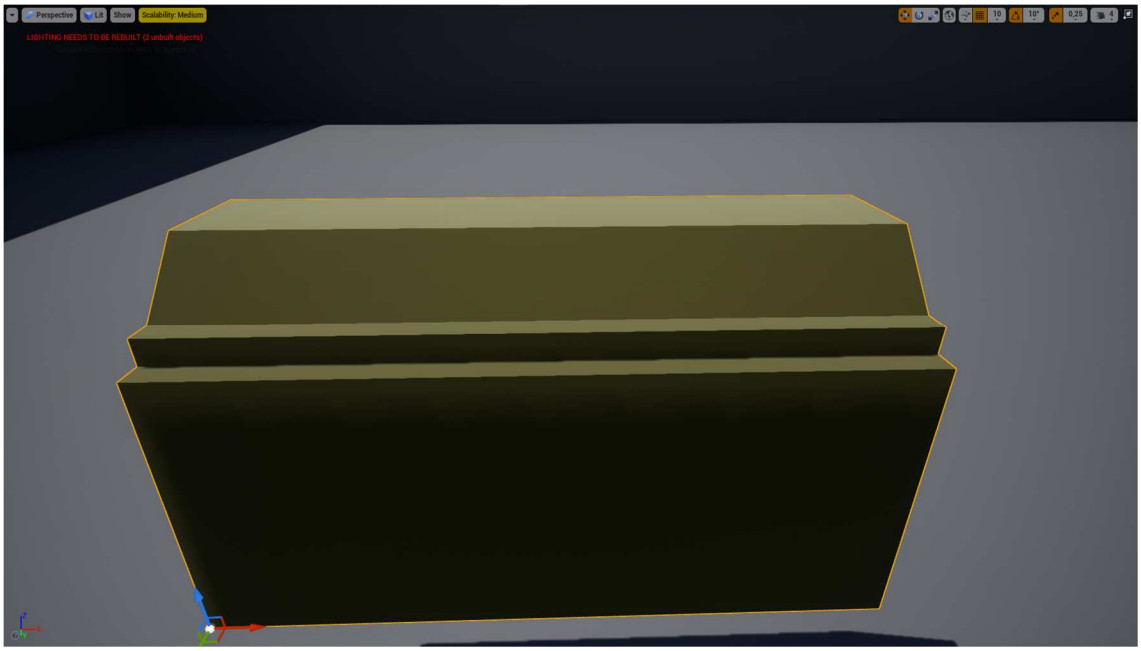


Fig. 2. STL model in Unreal Engine without UV map. Raw import [7]

We use this workflow to create levels for VR experiences and it saves time for our projects, because we create simple shapes in SOLIDWORKS and then in an Unreal Engine we create buildings. The benefit is that the DATASMITH keeps the dimensions in scale so, for example, 1 meter big in xyz cube in SOLIDWORKS is exactly similar and because of that the whole experience can be designed for example the scale of real building. These static meshes have advantage because then they can be vertex painted and the added layer of detail contributes to more photorealistic presentation.



Fig. 3. Scheme of software use in the particular order [8]

As we said, Quixel Megascans, which are free for Unreal Engine, also save significant time. These textures include information such as roughness, metallic and normal. Roughness is important because, as the name suggests, it changes meaning or shape, how rough a surface is, and how aggressively the light from that object is diffused. Normal map contributes to the physical shape of the model which can imitate, for example, a brick or stone surface. If correctly applied, these materials can increase the level of visual fidelity and make the final product more realistic. If we compare the end result between our method and the method of using DATASMITH, the results are pretty similar. The only difference is that by using this plugin we saved time and we had to do less work [9].

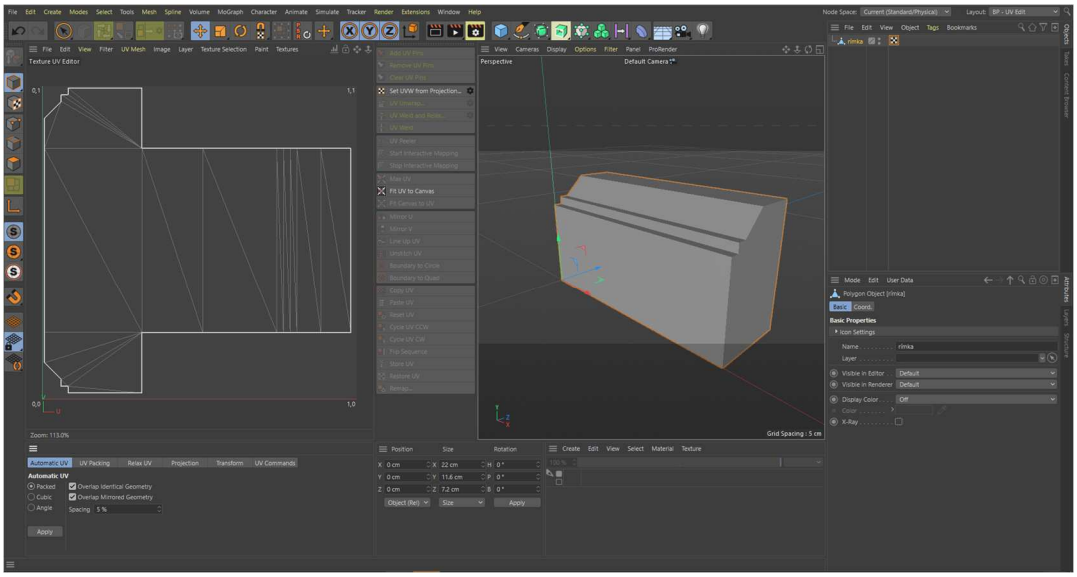


Fig. 4. STL model in Cinema 4D with uv map [9]

The difference of the STL and FBX file format. If we investigate the differences of these two formats, at the end we will see why the FBX format is more commonly used in game development. STL file format is used usually in stereolithography in CAD and has information only about the shape of the product. There is no information about the color or texture and other information like animations or audio add-ons. On the other hand, FBX file format, which is owned by AUTODESK, can store motion capture data, video data, animation data, audio data and usually is more commonly used in video games. Thanks to that, the FBX file format can be used not only for solid objects but for characters and other complex assets used in this type of application.

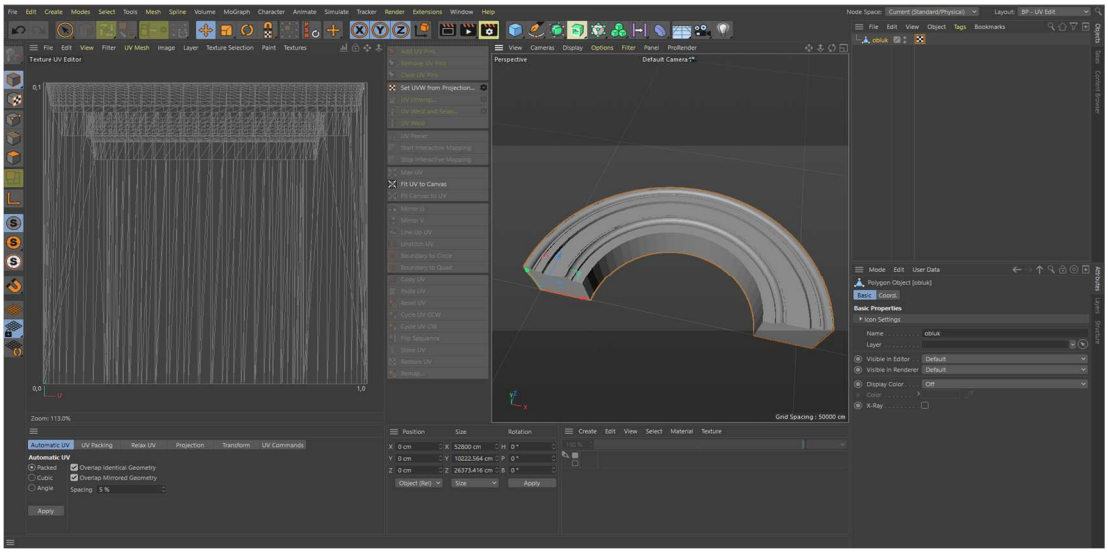


Fig. 5. STL model in Cinema 4D without UV map optimization [6, 8]

As we see, if we import the STL model to the graphics editing software, the model does not have any additional information and the showed UV map on Fig. 5 shows the unoptimized map of the surface, which is created only by interpretation by program of the model. The result is evident on the first sight, if we use the tool for optimizing the UV map.

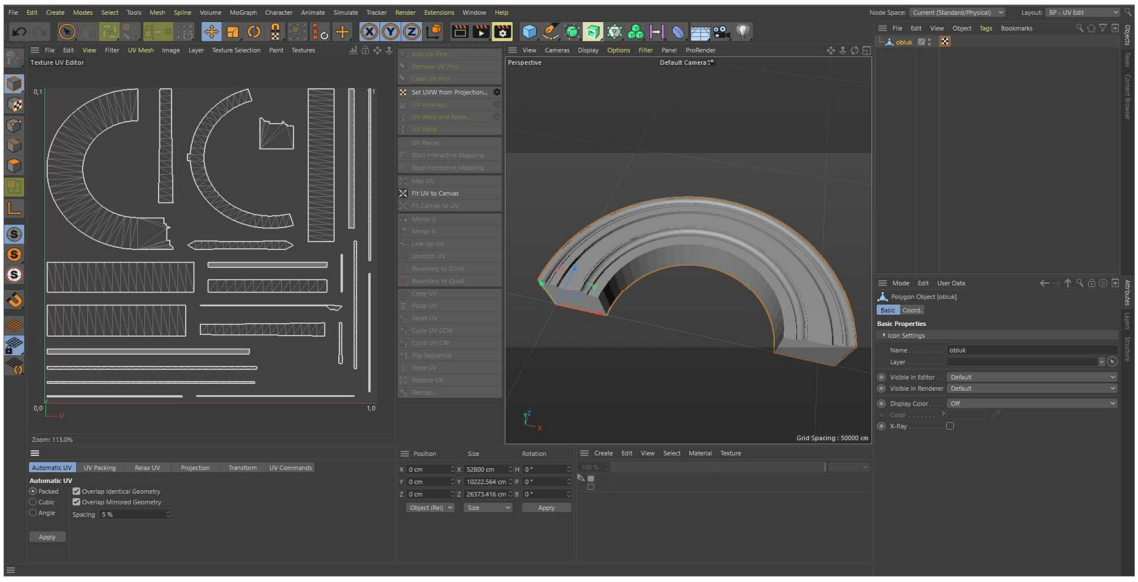


Fig. 6. STL model in Cinema 4D without UV map optimization [6, 9]

We see the end result of the optimized UV map on Fig 6. We used the tool built in the Cinema 4D and exported STL file format as FBX and now we achieved the parity, and our STL model is now FBX and have the information about the surface of the model and how to apply materials to it. On the other hand, if we create the model natively in the editor which is specifically created for graphics design like Blender or MAYA, the UV maps are created or edited in the process of the modeling. But the CAD software is not created for this kind of use case, so that's why we have to find this kind of workaround [10, 11].

The End Result. When we see the end results, it will be pretty similar, which is a good thing. That means that we can use both these workflows, but we need to think about which of these workflows is more efficient for us. The STL convention done manually gives us control on how we want to edit our models, but it requires from us to learn a new software, which is used in game development such as Blender or MAYA or Cinema 4D. On the other hand, the DATASMITH plugin gives us more straightforward conversion and is better for large data imports, such as architectural data.



Fig. 7. STL model and DATASMITH import in Unreal Engine side by side. Right is STL and left is DATASMITH import [6,10]

As we see, they look pretty similar, but we want to point out, that if we choose the STL method we need to take patience with choosing the correct dimensions for our model in CAD software, because if we choose small dimensions and scale it up, we can see aliasing on the edge of right model, Fig. 7. On the other hand, DATASMITH import looks pretty similar but the dimensions also are important, because they can save us time later in the engine, where we don't have to scale them properly later. Thanks to implementation of chord tolerances, the model imported this way is smoothed out in the engine.

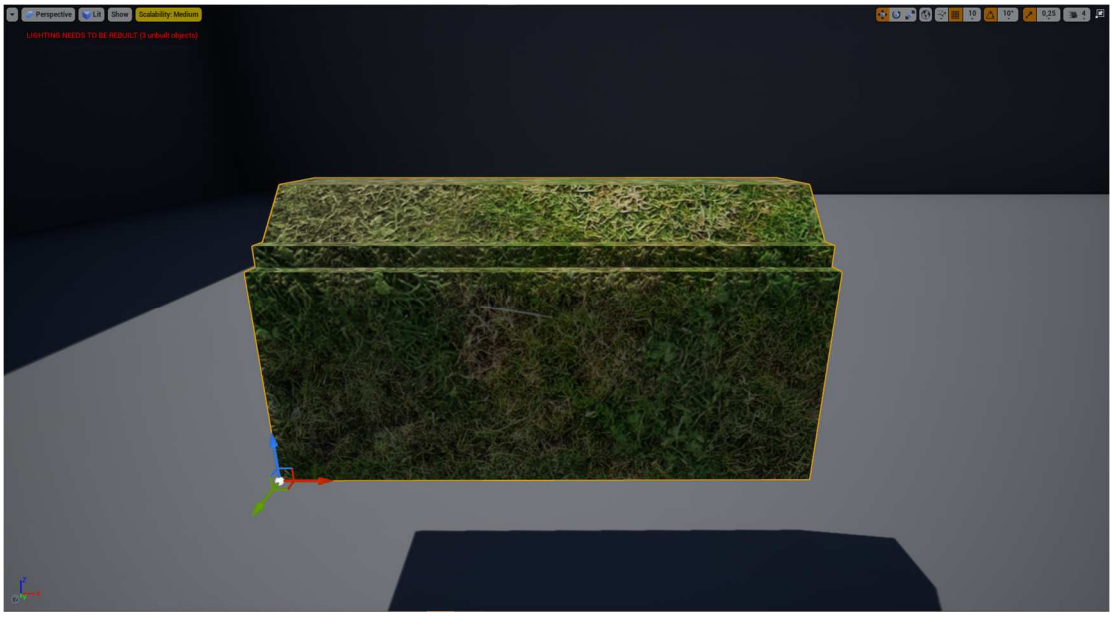


Fig. 8. STL model in Unreal Engine with optimized UV map [6]

If we look at the results of material appliance, the UV map optimization in Cinema 4D or done by DATASMITH is pretty much similar and the editing of the material can be done later, so the end result is very usable and can be used even in industrial applications.

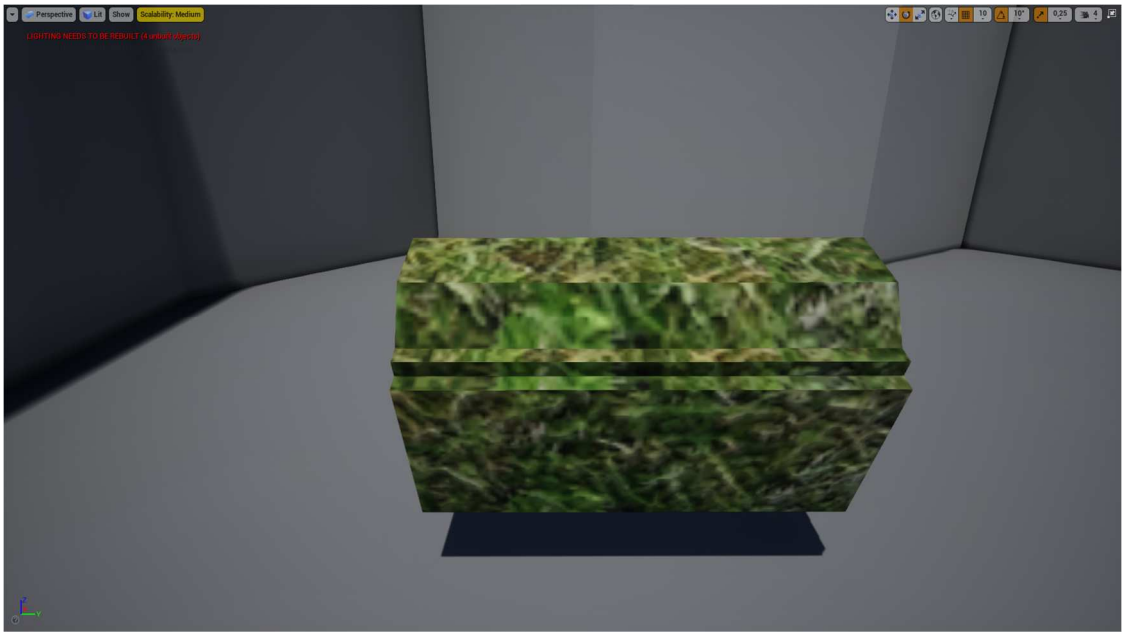


Fig. 9. STL model in Unreal Engine imported by DATASMITH UV map test [7, 9]

Conclusions. As the development of the real time rendering continues and as new technologies such as NVIDIA'S real time raytracing are coming to the mainstream, we are finally hitting that golden standard, which we call photorealism. Which is more impressive, these technologies are accessible through consumer hardware and the performance is doubling in the next generation. As we develop more powerful physics engines and we learn to use raytracing, we can create photorealistic real time simulations in close future, which can give us results in a matter of minutes. Maybe at the start they are not as detailed as traditional CAD software calculations, but with development of these tools we can soon hit that goal too. This opens a lot more possibilities for the future. We can modify the simulation in the middle of calculation or a designer can see in high fidelity detail the final product in real time without the need to wait several hours to render it. Also we can make these tools more accessible for non-professionals and make the learning curve less difficult and save time on rendering. There is also economic value when we can use consumer level hardware to create professional results. These reasons can be the foundation for our prediction that the future of rendering is real time rendering.

Acknowledgement. The authors would like to thank to Slovak Grant Agency – project KEGA 018TUKE-4/2018 "Implementation of new technologies and educational methods in the field of control systems to improve education level and practical skills of graduates of Mechatronics" and project VEGA 1/0389/18, "Research and development of kinematic redundant mechanisms"

References

1. Klein R., Straßer W. (1997) Generation of Multiresolution Models from CAD-Data for Real Time Rendering. In: Strasser W., Klein R., Rau R. (eds) Geometric Modeling: Theory and Practice. Focus on Computer Graphics (Tutorials and Perspectives in Computer Graphics). Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-60607-6_21.

2. Y. Tang and H. Gu, "CAD Model's Simplification and Conversion for Virtual Reality," 2010 Third International Conference on Information and Computing, Wuxi, 2010, pp. 265-268, doi: 10.1109/ICIC.2010.338.

3. Ben Abdallah, H.; Jovančević, I.; Orteu, J.-J.; Brèthes, L. Automatic Inspection of Aeronautical Mechanical Assemblies by Matching the 3D CAD Model and Real 2D Images. J. Imaging 2019, 5, 81.

4. H. Li, C. Shen and Q. Shi, "Real-time visual tracking using compressive sensing," CVPR 2011, Providence, RI, 2011, pp. 1305-1312, doi: 10.1109/CVPR.2011.5995483.

5. J. Xue, X. Zhai and H. Qu, "Efficient Rendering of Large-Scale CAD Models on a GPU Virtualization Architecture with Model Geometry Metrics," 2019 IEEE International Conference on Service-Oriented System Engineering (SOSE), San Francisco East Bay, CA, USA, 2019, pp. 251-2515, doi: 10.1109/SOSE.2019.00043.

6. Epic Games, Inc. (2020). Unreal engine learning portal. Retrieved from: https://docs.unrealengine.com/en-US/Engine/Content/Importing/Datasmith/index.html.

7. Epic Games, Inc. (2020). Unreal engine the article about autonomous drives. Retrieved from: https://www.unrealengine.com/en-US/blog/making-autonomous-vehicles-safer-before-they-hit-the-road.

8. Omar Shakshak, Igor Evsikov, Timur Ablyazov, Igor Yamshanov, " Interactive Digital Model of Assessing Energy Efficiency of Buildings," International Conference on Digital Technologies in Logistics and Infrastructure (ICDTLI 2019), Atlantis Press, pp. 2589-4900, doi:10.2991/icdtli-19.2019.59

9. G. Eriksson and A. Engberg, 'Automating the CAD to Virtual Reality Pipeline for Assembly Simulation', Dissertation, 2020.

10. ZHU Hu,YANG Zhongfeng,ZHANG Wei, "Progress in Study of STL File and Its Application," College of Mechanical and Electrical Engineering, Shenyang Institute of Aeronautical Engineering, Shenyang Liaoning 110136,China, http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTotal-JCYY200906065.htm.

11. Kenton McHenry, Peter Bajcsy, "An Overview of 3D Data Content, File Formats and Viewers," National Center for Supercomputing Applications, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL. (2008), Technical Report: isda08-002.

УДК 004.94:004.92

Ерік Прада, Адам Коларж

МОЖЛИВОСТІ КОНВЕРТУВАННЯ CAD-МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ В РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ

Актуальність теми дослідження. *Запропоновані методи можуть заощадити дорогоцінний час та в деяких випадках скоротити витрати на обладнання, а також спростити розробку та візуалізацію продуктів для нетехнічних професіоналів.*

Постановка проблеми. *Використання безкоштовних та платних продуктів для застосування в сучасному бізнесі та у школах для оптимізації фази проектування та дослідження, а також створення умов для навчання кваліфікованого персоналу в екстремальних умовах.*

Аналіз останніх досліджень і публікацій. *Ці оптимізації здійснюються безпосередньо розробниками інструментів моделювання в режимі реального часу та деякими великими компаніями, але багато з них розділені на більш дрібні підприємства і потребують одних рекомендацій, які були б основними.*

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. *Методологія перетворення CAD моделей для візуалізації в реальному часі.*

Постановка завдання. *Створити єдиний стандарт процедур, що дозволяють використати можливості інструментів візуалізації в режимі реального часу та знайти способи їх використання у виробничій практиці.*

Виклад основного матеріалу. *У статті представлені можливості використання ігрового рушія Unreal Engine та аддону Epic Games DATASMITH для перетворення CAD моделей у програмне забезпечення для візуалізації в реальному часі.*

Висновки відповідно до статті. *Ігрові рушії можна використовувати з такими інструментами, що спрощують художникам та іншим нетехнічним працівникам миттєве бачення результатів роботи. Крім того, ці інструменти можуть бути використані для різних видів моделювання із більш високою ефективністю, але результати можуть бути менш точними. Проте з появою кращих інструментів та кращою інтеграцією програмного забезпечення САПР, ці результати можна покращити. На нашу думку, майбутнім проєктування та тестування продуктів є тестування в реальному часі.*

Ключові слова: *CAD-модель; DATASMITH; Unreal Engine; UV-розгортка; віртуальна реальність.*
Рис.: 9. Бібл.: 11.

Erik Prada – Doctor of Technical Sciences, Proffessor , Technical University of Kosice Department of Mechatronics, Faculty of Mechanical Engineering (Park Komenského 8, 042 00 Košice, Slovak Republic).
E-mail: erik.prada@tuke.sk
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7226-1240
ResearcherID: R-3524-2016
Scopus Author ID: 55873860000

Adam Kolář – Student of Study Program Bachelor of Industrial mechatronic Technical University of Kosice Department of Mechatronics, Faculty of Mechanical Engineering (Park Komenského 8, 042 00 Košice, Slovak Republic).
E-mail: adam.kolar@student.tuke.sk

Prada, E., Kolář, A. (2020). Possibilities of convert cad models for real time rendering software. *Technical sciences and technologies*, *3*(21), pp. 220-228.

РОЗДІЛ ІІІ. ЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

УДК 621.316
DOI: 10.25140/2411-5363-2020-3(21)-229-241

Юрій Томашевський, Олександр Бурикін, Володимир Кулик,
Юлія Малогулко, Владислав Гриник

ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА РОЗПОДІЛЬНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ НА БАЗІ КОНЦЕПЦІЇ SMART METERING ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ТИПОВИХ ГРАФІКІВ НАВАНТАЖЕННЯ

Актуальність теми дослідження. *Використання інформаційних систем та баз даних стає невід'ємною складовою діяльності енергетичних компаній. Інформація про виробництво та споживання електроенергії зберігається в агрегованому вигляді. Це не дає змоги визначати складові балансових витрат електроенергії методом поелементних розрахунків та аналізувати їх структуру. Таким чином, вдосконалення математичного та програмного забезпечення інформаційних систем обліку електроенергії з метою підвищення адекватності визначення втрат електроенергії у розподільних мережах є актуальним завданням.*

Постановка проблеми. *Оснащення розподільних електричних мереж засобами моніторингу їхніх параметрів часто виявляється недостатнім для розв'язування задач планування та ведення режимів. Тому метою дослідження є аналіз можливості застосування системного підходу до створення інформаційних систем РЕМ з використанням даних автоматизованих систем комерційного обліку електроенергії та інших наявних джерел інформації для підвищення точності моделювання характерних режимів мереж та складових балансу електроенергії.*

Аналіз останніх досліджень і публікацій. *Нині використовуються декілька підходів для перевірки та відновлення даних щодо електричних навантажень у системах АСКОЕ та Smart Metering: 1) технологія великих даних (Big Data Technology – data management); 2) глобальне обчислення на основі не втрачених даних; 3) статистичні методи; 4) штучні нейронні мережі; 5) кластерний аналіз; 6) застосування методів оцінювання стану; 7) використання типових графіків електричних навантажень. Наведені підходи можуть комбінуватися для отримання додаткових переваг.*

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. *Необхідною умовою для використання наявних підходів є наявність невтрачених даних. Це робить принципово неможливим застосування відомих підходів для дослідження режимних параметрів РЕМ з прийнятною точністю.*

Постановка завдання. *Отже, основним завданням є дослідження можливості використання системного підходу до побудови інформаційних систем РЕМ із застосуванням технології Smart Metering, а також методів та алгоритмів, які використовуючи наявну інформацію, агреговану за часовими періодами, дадуть змогу визначати режимні параметри РЕМ з необхідною точністю.*

Виклад основного матеріалу. *Для розгортання агрегованих даних у графіки навантаження та генерування, у роботі запропоновано використовувати типові графіки енергообміну споживачів та місцевих джерел енергії. Для узгодження виміряних параметрів режиму та псевдовимірювань, розрахованих за типовими графіками, запропоновано використовувати алгоритм на основі методу найменших квадратів. Оцінювання точності проводилося шляхом зіставлення втрат електроенергії для цілком спостережної мережі з результатами імітаційних розрахунків.*

Висновки відповідно до статті*. Встановлено, що застосування типових графіків навантаження та генерування дає змогу відновлювати графіки енергообміну споживачів та місцевих джерел енергії з прийнятною точністю. Використання типових графіків навантаження та генерування (псевдовимірювань) дає змогу зменшити вартість систем моніторингу розподільних мереж.*

Ключові слова: *розподільна електрична мережа; баланс електроенергії; втрати електроенергії; відновлення параметрів режиму; типовий графік навантаження; оцінювання стану.*

Рис.: 6. Бібл.: 18.

Актуальність теми дослідження. Використання інформаційних систем та баз даних стає невід'ємною складовою діяльності енергетичних компаній. На електронну основу переходить документообіг, зростає кількість нового обладнання, впроваджуються системи збору та керування даними, зокрема, керування транспортуванням та розподілом електроенергії.

Найбільш відомою інформаційною системою розподільних електричних мереж є автоматизована система комерційного обліку електроенергії (АСКОЕ). Вона забезпечує облік електричної енергії (ЕЕ) на основі даних, що одержувані безпосередньо від лічильників і/або вимірювальних перетворювачів. Масове інтегрування до АСКОЕ інтелектуальних приладів обліку з можливістю зберігання і передавання даних на основі технології *Smart Metering* дає змогу вирішувати комплекс нових актуальних завдань.

© Томашевський Ю. В., Бурикін О. Б., Кулик В. В., Малогулко Ю. В., Гриник В. А., 2020

Наприклад, віддалене зняття показань із приладів обліку, автоматичне фіксування їх за певний проміжок часу, виявлення осередків втрат ЕЕ, а також миттєве дистанційне обмеження навантаження та припинення електропостачання.

Застосування інформації, накопиченої системами Smart Metering, підвищує спостережність розподільної електричної мережі (РЕМ) завдяки використанню виміряних графіків електроспоживання. Наявність синхронізованої інформації про виміряні режимні параметри розподільної електричної мережі дає змогу визначати обсяги спожитої електроенергії стандартними алгебраїчними методами [1]. Проте, досить часто через відмову апаратного або інформаційного забезпечення ці дані можуть не надходити протягом усієї доби або її частини. Під час вимірювань, а також передачі інформації спостерігається вплив електромагнітних завад від засобів автоматичного регулювання, розсинхронізація або спрямовані атаки на інформаційні мережі сторонніми особами у вигляді ручного або «вірусного» втручання [2-4]. Це призводить до втрати окремих пакетів інформації. Таким чином, необхідною умовою функціонування інформаційної системи РЕМ є можливість відновлення втраченої інформації.

Постановка проблеми. Метою дослідження є аналіз можливості застосування системного підходу до створення інформаційних систем РЕМ із використанням даних автоматизованих систем комерційного обліку електроенергії та інших наявних джерел інформації для автоматизації керування розподільними електричними мережами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогодні використовуються декілька підходів для перевірки та відновлення даних щодо електричних навантажень у системах АСКОЕ та Smart Metering:

1) технологія великих даних (*Big Data Technology – data management*) [5];
2) глобальне обчислення на основі не втрачених даних [6];
3) статистичні методи [7, 8];
4) штучні нейронні мережі [3];
5) кластерний аналіз [3, 9];
6) застосування методів оцінювання стану [10];
7) використання типових графіків електричних навантажень [3; 11; 12].

Наведені підходи можуть комбінуватися, для отримання додаткових переваг.

Необхідною умовою для використання наведених підходів є наявність невтрачених даних. Тобто для частини мережі необхідні вимірювання в об’ємах, достатніх для відновлення інформації, або великий набір ретроспективних даних для відновлення втраченої інформації та виявлення викидів у вимірюваннях.

Відповідно до проведеного аналізу для подальшого дослідження вбачається застосування комбінованого підходу методів оцінки стану [10] для часової синхронізації інформації та застосування типових графіків електричних навантажень для відновлення агрегованої в часі інформації [11; 12] про облік електроенергії.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Оснащення розподільних мереж засобами АСКОЕ досить витратне, тому здебільшого облік ЕЕ проводиться за участі персоналу служби комерційного обліку електроенергії РЕМ або споживачів. Такий спосіб збору й оброблення комерційних вимірів є джерелом помилок і спотворень комерційних даних. Крім того, агрегування інформації призводить до складності адекватного оцінювання структури балансу ЕЕ та виділення неефективних підсистем та елементів електричних мереж. Це робить принципово неможливим застосування відомих підходів для дослідження режимних параметрів РЕМ із прийнятною точністю.

Постановка завдання. Таким чином, основним завданням є дослідження можливості використання системного підходу до побудови інформаційних систем РЕМ із застосуванням технології Smart Metering, а також методів та алгоритмів, які використовуючи наявну інформацію, агреговану за часовими періодами, дадуть змогу визначати режимні параметри РЕМ з необхідною точністю.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

– проаналізувати наявність джерел для підвищення спостережності ЕМ в умовах неповної вихідної інформації;

– проаналізувати можливості використання інформації АСКОЕ для підвищення спостережності РЕМ в умовах неповної вихідної інформації;

– розробити метод оцінювання параметрів режимів розподільних мереж із використанням інформації АСКОЕ та інших;

– перевірити адекватність розробленого методу та можливість його застосування у інформаційних системах РЕМ з використанням натурного експерименту.

Аналіз можливості використання наявної інформації АСКОЕ та інших джерел для підвищення спостережності електричних мереж

Відповідно до концепції побудови [13] автоматизовані системи комерційного обліку електроенергії для побуту і сфери послуг є ієрархічною системою. Вона забезпечує автоматизований облік ЕЕ на основі даних, що надходять безпосередньо від лічильників і/або вимірювальних перетворювачів ЕЕ. Основною метою створення АСКОЕ є вирішення питань фінансових відносин на основі точної та оперативно одержуваної інформації, вирішення питань підвищення ефективності та раціонального використання паливно-енергетичних ресурсів, а також енергозбереження. Отже, наявність повної інформації в базі даних АСКОЕ для всієї РЕМ може забезпечити її спостережність для розв'язання технічних задач, наприклад, аналізу структури технологічних витрат електроенергії (ТВЕ).

Однак на сьогодні в більшості енергопостачальних компаній встановлення АСКОЕ передбачено лише для периметра (у точках комерційного обліку перетікань від/до сусідніх електричних мереж) та юридичних споживачів. Таким чином, для окремих фрагментів РЕМ спостережність забезпечується лише у випадку електропостачання юридичних споживачів.

Водночас для балансування електроенергії у РЕМ на вводах підстанцій 110-35 кВ, а також на головних ділянках ліній 20-6 кВ передбачено вимірювальні засоби технічного обліку.

Додатковим джерелом інформації про споживання електроенергії є білінгові системи енергопостачальних організацій. У них зберігається інформація про корисний відпуск ЕЕ у точках продажу протягом облікового періоду.

Оскільки інформаційне забезпечення фінансових взаєморозрахунків РЕМ ґрунтується на даних обліку, отриманих із різних джерел із різним ступенем достовірності, зростає комерційна складова втрат електроенергії.

Для створення належного інформаційного забезпечення та підвищення достовірності даних обліку електроенергії у [12] запропоновано використовувати усереднені за часом та сукупністю електроприймачів типові графіки навантаження (ТГН). Для кожного ТГН зазначено перелік кодів споживачів згідно з категоріями видів економічної діяльності (КВЕД), що дає змогу визначати для конкретного споживача відповідний ТГН. Використання КВЕД у білінговій системі забезпечує можливість зіставлення інформації щодо електроспоживання за період інтегрування з типовим графіком навантаження споживача.

Типові графіки подаються у вигляді погодинних характеристик математичного очікування та середньоквадратичного відхилення активного й реактивного навантажень, а також характеристики коефіцієнта кореляції активного й реактивного навантажень (рис. 1).

Табиця А.1.1

Графік електричних навантажень споживачів наступних категорій видів економічної діяльності «01.45» «14.11» «10.42» «32.11» «30.40» «10.31» «02» «16.2» «25.93» «30.92» «03.12» «22» «11.05» «24.42»

Місяць - січень Коефіцієнт форми - 1.07

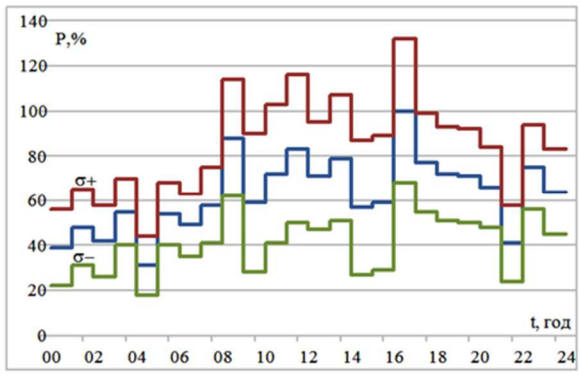
P	39	48	42	55	31	54	49	58	88	59	72	83	71	79	57	59	100	77
σ_P	17	17	16	15	13	14	14	17	26	31	31	33	24	28	30	30	32	22
Q	12	18	11	19	10	20	19	23	26	20	23	24	16	23	19	17	28	22
σ_Q	7	7	6	6	4	5	6	11	13	20	19	19	10	15	19	18	18	10
K	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8

Табиця А.1.2

Графік електричних навантажень споживачів наступних категорій видів економічної діяльності «28.12» «30.2» «28.14» «24.44» «28.49» «27.2» «31.0» «21.2» «32.12» «11.03» «35» «19» «46.63» «30.3» «13.96» «37» «01.47» «28.96»

Місяць - січень Коефіцієнт форми - 1.10

P	36	40	46	36	43	40	41	47	86	88	100	91	67	82	83	59	60	60
σ_P	15	16	17	13	14	18	15	29	88	80	80	82	53	71	68	51	24	20
Q	18	20	21	17	20	18	18	20	30	31	34	28	20	30	30	21	22	22
σ_Q	7	8	8	7	7	8	7	11	26	28	27	21	13	24	22	19	10	8
K	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,7	0,8	0,8	0,8	0,9	0,8	0,9	0,9	0,9	0,8	0,6



а *б*

Рис. 1. Подання інформації в альбомі типових графіків електричних навантажень: а – у табличній формі; б – в інтерпретованій графічній формі

Математичне очікування навантаження нормується відносно максимального значення і подається у відсотках. Таким чином, ТГН дає змогу розкласти значення сумарної спожитої енергії за обліковий період до вигляду імовірного погодинного графіка навантаження, доповнюючи базу даних інформаційної системи РЕМ псевдовимірюваннями.

Метод оцінювання параметрів режиму розподільних мереж із використанням агрегованих у часі даних обліку електроенергії.

Задачу використання агрегованої в часі інформації автоматизованих систем комерційного обліку електроенергії можна розглядати як задачу мінімізації похибок вимірювання режимних параметрів РЕМ у теорії оцінювання стану (ОС) електричної мережі [17]. Для аналізу достовірності вимірюваної інформації розроблено кілька підходів. Класична для електроенергетики задача ОС [14–18] використовує як рівняння стану рівняння усталеного режиму. Змінними цих рівнянь є значення активної та реактивної потужностей, струмів і напруг, а умовно постійними коефіцієнтами – параметри заступної схеми РЕМ. Значення струмів, напруг та потужностей вважаються телевимірами із заданою вірогідністю [14].

Режим електричної мережі, що характеризується цими параметрами, відповідає певному моменту (проміжку) часу й постійно змінюється. Наслідком цього є необхідність періодичного коригування несинхронізованих та помилкових телевимірів так, щоб у сукупності з вірогідними параметрами режиму виміряні значення відповідали умовам виконання балансу потужності у РЕМ.

Особливості системи технічного моніторингу сучасних розподільних мереж, зокрема, недостатня кількість засобів синхронізованого телевимірювання режимних параметрів, не дають змоги безпосередньо використовувати методи оцінювання стану в таких мережах.

На сьогодні апаратна частина системи технічного моніторингу РЕМ складається переважно з вимірювальних пристроїв, встановлених на вводах трансформаторних підстанцій 110-35 кВ та на головних ділянках ліній 20-6 кВ. Це не забезпечує необхідної спостережності навіть для характерних режимів. Відповідно до сукупності вимірюваних параметрів у РЕМ, їх точності та можливості синхронізації, для оцінювання стану доцільно застосовувати підходи, що базуються на методі найменших квадратів. Як модулі усталеного режиму РЕМ найчастіше використовують рівняння у формі балансу струмів, як функції вузлових напруг у полярних та прямокутних координатах.

Метод оцінювання стану на основі методу найменших квадратів ґрунтується на лінеаризації взаємозв'язку між вимірюваннями та змінними стану електричної мережі. Нелінійні співвідношення між вектором стану та виміряними електричними змінними можна подати в такому вигляді [18]:

$$\mathbf{z} = \mathbf{h}(\mathbf{x}) + \mathbf{v}, \quad (1)$$

де **z** – вектор синхронізовано виміряних параметрів електричних мереж; **x** – вектор змінних стану РЕМ; **h**(**x**) – векторна функція, яка пов'язує вимірювання зі змінними стану на основі балансових рівнянь для РЕМ; **v** – вектор відхилень між виміряними та розрахунковими параметрами режиму.

Для формування вектору стану **x** можна використовувати нескінченну кількість комбінацій значень змінних, однак практичну цінність має така комбінація, що забезпечує мінімізацію абсолютних значень вектора **v**. З огляду на це цільова функція задачі визначення вектора стану РЕМ у загальному вигляді:

$$J(x) = \sum_{i=1}^{m} \frac{[z_i - h_i(x)]^2}{\sigma_i^2} = \left[z - h(x)\right]^T W \left[z - h(x)\right] \to \min, \quad (2)$$

де σ – стандартне відхилення кожного вимірювання; $W = diag\left[\sigma_1^{\,2}, \sigma_2^{\,2}, \ldots, \sigma_m^{\,2}\right]^{-1}$ – обернена діагональна матриця очікуваних (оцінених) середньоквадратичних відхилень окремих вимірювань.

Зазвичай як змінний стан x_i приймають модуль U_i та фазний кут δ_i напруги в незалежних вузлах РЕМ. Вимірюваними параметрами в РЕМ є модулі напруги в окремих вузлах $U_i^{\text{в}}$, активні $P_i^{\text{в}}$ та реактивні $Q_i^{\text{в}}$ потужності у вузлах навантаження та генерування, що оснащені засобами АСКОЕ, активні $P_j^{\text{в}}$ та реактивні $Q_j^{\text{в}}$ потужності, що протікають лініями та трансформаторами, що оснащені засобами телевимірювання.

Особливістю РЕМ є недостатність вектору спостереження **z**. Тобто, використовуючи суто виміряні параметри не вдається ідентифікувати стан РЕМ, адже задача (2) не має розв'язків. Доповнення вектору **z** інформацією з типових графіків навантаження (псевдовимірами) для вузлів РЕМ, дасть змогу залучити ресурси наявних засобів вимірювання та моніторингу для забезпечення спостережності електричної мережі без додаткових фінансових витрат.

Як очікувані середньоквадратичні відхилення псевдовимірювання W_i для неспостережних вузлів пропонується використовувати значення, наведені в атласі типових графіків навантаження для споживача, відповідно до його коду КВЕД [12].

Можливість застосування пропонованого підходу в інформаційній системі розподільної електричної мережі з використанням ТГН та бази даних АСКОЕ була перевірена на прикладі реальних міських електромереж 10 кВ.

Перевірка адекватності розробленого методу з використанням натурного експерименту.

Для перевірки адекватності відтворення динаміки режиму частково спостережної РЕМ на основі ТГН було використано фрагмент Вінницьких міських електричних мереж 10 кВ – фідер Ф-165 підстанції 110/10 кВ «Західна». Фідер містить 5 споживальних підстанцій (рис. 2) з трансформаторами 10/0,4 кВ різних потужностей. Від підстанцій фідера отримують живлення промислові (17 %) та побутові (83%) споживачі. Використовуючи електронні лічильники, для фідера було забезпечено синхронізовану реєстрацію параметрів надходження та відпуску електроенергії з півгодинним інтервалом протягом 22 діб. Таким чином було забезпечено повну спостережність мережі для визначення балансових втрат електроенергії. Крім того, отримано дані для оцінювання розподілу навантаження між підстанціями для 1056 півгодинних періодів. Приклад результатів вимірювань наведено на рис. 3.

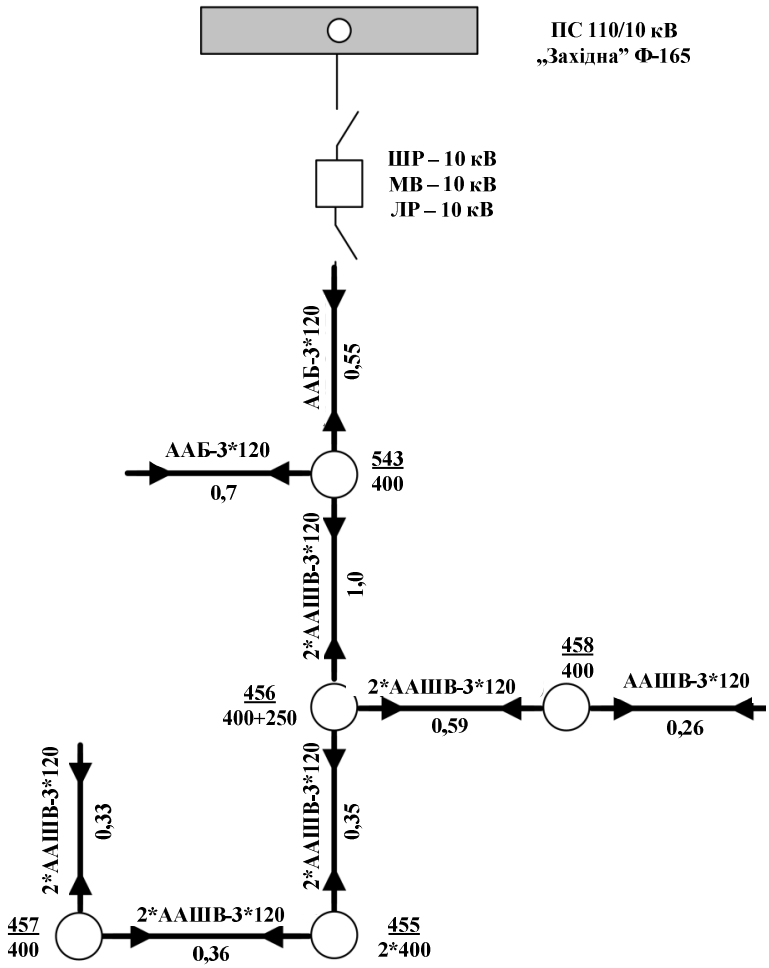
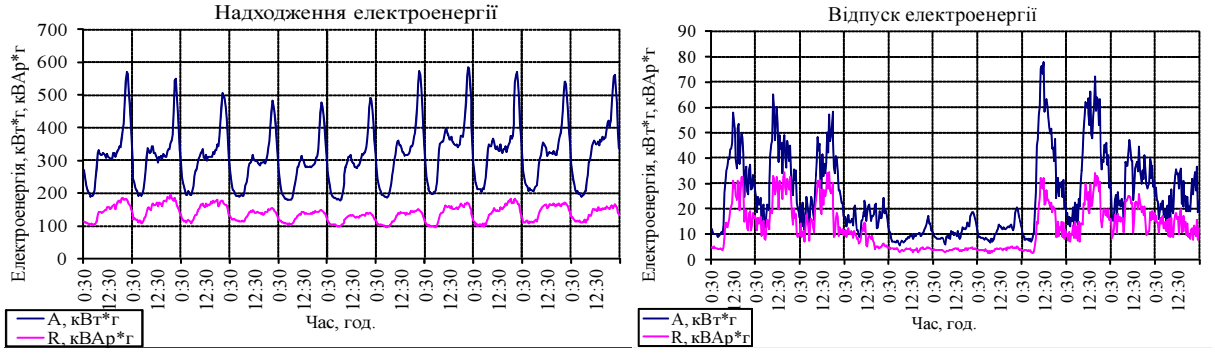


Рис. 2. Фрагмент спостережної електричної мережі 10 кВ

З рис. 2 видно, що до вибірки увійшли як робочі, так і святкові дні (рис. 3, *б*), а перелік споживачів фідера містить юридичних та побутових абонентів. Останнє дає змогу робити узагальнення за результатами аналізу основної та тестової вибірок.



а *б*

Рис. 3. Приклад виміряних значень протягом одинадцяти днів:
а – надходження електроенергії з головної ділянки фідера;
б – відпуск електроенергії по ТП-543

Оцінювання стану електричної мережі за умови достатньої кількості даних та повної спостережності була виконана на основі зважених найменших квадратів (*WLS*) [18] у програмному середовищі MathCad 15 (Mathsoft, США). Таким чином було доведено, що за наявності повної інформації про надходження та споживання електроенергії

результати розрахунків практично збігаються з виміряними значеннями (рис. 3). Максимальна відносна похибка моделювання була обчислена на основі зіставлення вектору виміряних параметрів **z**, тобто осереднених потужностей навантаження на півгодинному інтервалі, та їх розрахункових значень **h**(**x**):

$$\delta_{\max} = \frac{z_i - h_i(x)}{z_i} \cdot 100, \qquad (3)$$

і становила менше за 0,01 % (рис. 4, *а*).

Для експериментального підтвердження можливості використання ТГН з метою формування псевдовимірів було виконано заміну виміряних графіків зміни потужностей для вузлів ТП-458, ТП-543. ТП-455 та ТП–456 на відтворені на основі типових графіків та сумарного споживання ЕЕ (інформація з АСКОЕ). Після оцінювання стану РЕМ та визначення **h**(**x**) було розраховано відносні похибки оцінювання півгодинних режимів (рис. 4, *б–г*).

На рис. 4, *б, в* показано діаграми зміни відносної похибки оцінювання режимів для випадку використання псевдовимірів у вузлі з найбільшим електроспоживанням (ТП-458) та у вузлі з найменшим електроспоживанням (ТП-543), відповідно. Для кожного з 48 вимірювань добового графіка відносна похибка їх відтворення не перевищує 0,01 %. Тобто використовуючи ТГН та оцінювання стану інформацію про зміни електроспоживання у вузлах РЕМ було відновлено з високою точністю.

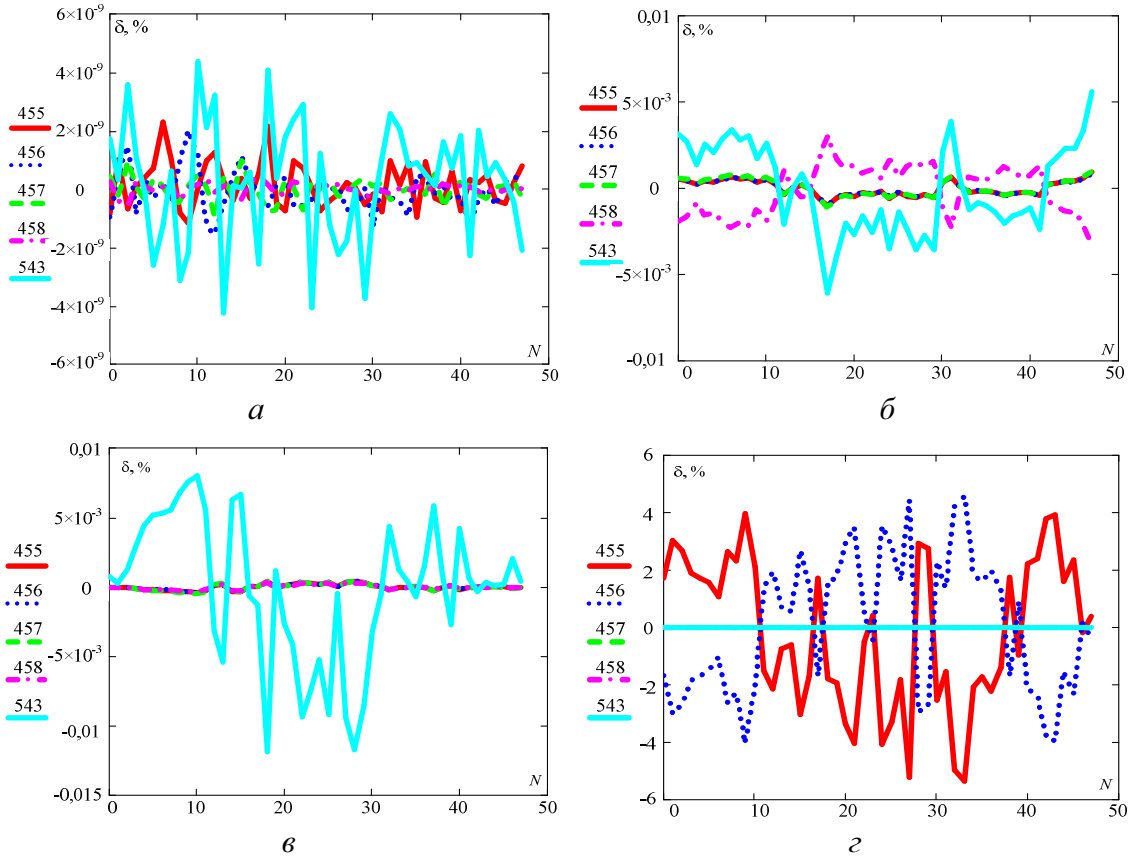


Рис. 4. Максимальні відносні похибки моделювання динаміки електроспоживання: а – для абсолютно спостережної мережі; б – за відсутності вимірів у вузлі ТП-458; в – за відсутності вимірів у вузлі ТП-543; г – за відсутності вимірів у вузлах ТП-455 та ТП–456

На рис. 4, *г* показано діаграми зміни відносної похибки за відсутності виміряної інформації для вузлів ТП–455 та ТП–456, які мають найбільшу кількість приєднаних ліній. Ці вузли були відібрані, оскільки наявність телевимірів для них істотно впливає на перетікання енергії у ЕМ. Використання псевдовимірів у вказаних вузлах призвело до зростання відносної похибки оцінювання динаміки електроспоживання до 5 %.

Таким чином, за результатами розрахунків було встановлено, що інформацію про динаміку електроспоживання у РЕМ можна відновити з прийнятною точністю завдяки використанню типових графіків навантаження та інформації АСКОЕ. Отримані результати також дають підстави для постановки задачі оптимізації структури інформаційної системи на базі Smart Metering, зокрема мінімізації кількості вимірювальних пристроїв з забезпеченням заданої точністю відтворення параметрів режиму РЕМ.

Інформаційна система розподільної електричної мережі на базі концепції Smart Metering

Наявність достовірної інформації про режими РЕМ створює передумови для підвищення ефективності розроблення електроощадних заходів в умовах недосконалості вихідної інформації та адресного енергопостачання споживачів завдяки вдосконаленню математичних моделей та застосуванню технологій комп'ютерних експертних систем.

Отримані результати підтверджують важливість врахування взаємозв’язків між параметрами режиму ЕМ та характеристиками навантаження. Похибка, яка виникає внаслідок мінімізації відхилень псевдовимірів та реальних вимірів параметрів режиму РЕМ, розподіляється згідно з ваговими коефіцієнтами – заданих середньоквадратичних відхилень параметрів.

Аналізуючи результати експериментів можна отримати висновок про доцільність застосування в досліджуваному фрагменті електричної мережі лише 3-х вимірювальних пристроїв *Smart Metering*, що дасть змогу суттєво зменшити витрати на впровадження інформаційної системи (рис. 5).

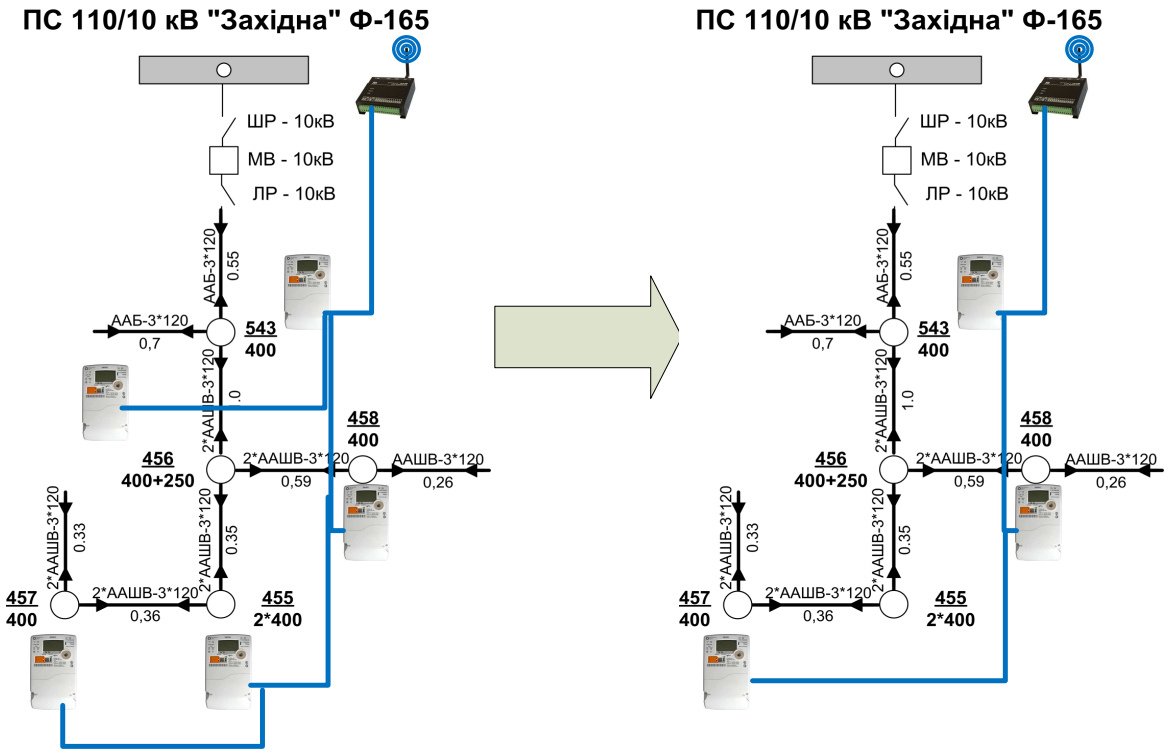


Рис. 5. Вибір місця встановлення вимірювальних пристроїв Smart Metering

Результати розрахунку відносних похибок моделювання динаміки електроспоживання вказують на те, що відсутність вимірювань у двох найбільш важливих з погляду інформативності вузлах призведуть до зростання відносної похибки оцінювання режиму до 5 %. Отже, задавши необхідну точність моделювання, можна отримати відповідну структуру інформаційної системи РЕМ з мінімальними витратами, а також послідовність впровадження засобів інформаційної системи. Застосування такої інформаційної системи дасть змогу визначати структуру ТВЕ в місцевих (локальних) електричних мережах напругою 0,38-110 кВ енергопостачальних компаній із кількісним оцінюванням технічних розрахункових втрат електроенергії в елементах мереж, витрат електроенергії на власні потреби підстанцій та нетехнічних втрат із необхідною точністю.

Пропонована інформаційна система розподільної електричної мережі на базі концепції *Smart Metering* має вигляд, показаний на рис. 6. Інформаційні зв'язки вимірювальних пристроїв з базою даних оперативно-інформаційного комплексу дають змогу на рівні диспетчерського керування враховувати експлуатаційні особливості споживачів ЕЕ та локальної електричної системи.

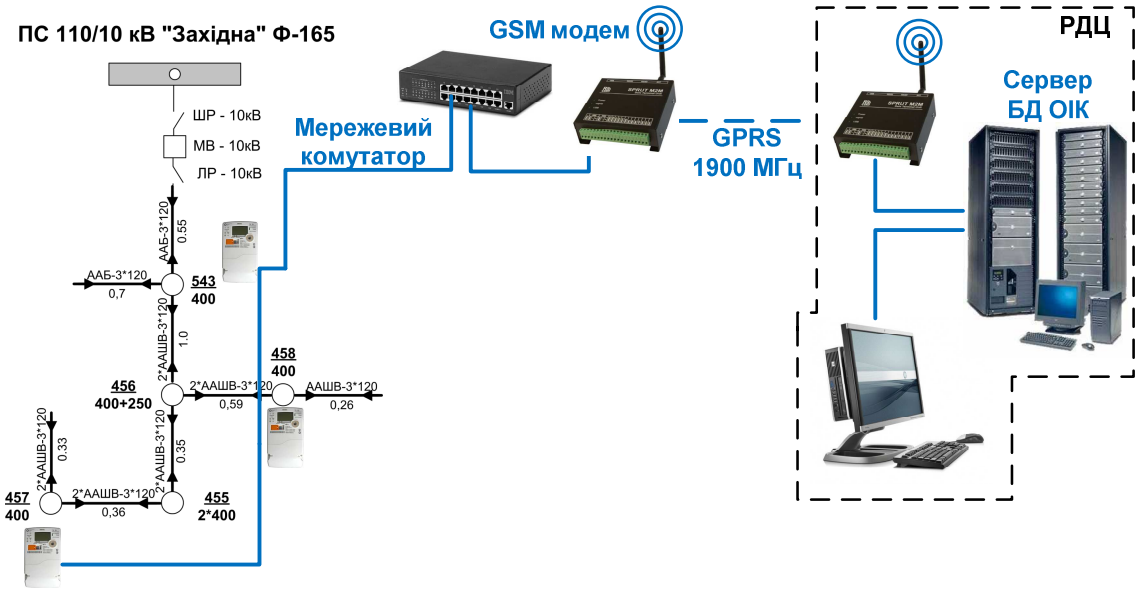


Рис. 6. Пропонована інформаційна система розподільної електричної мережі на базі концепції Smart Metering

Висновки відповідно до статті.

1. Дослідження можливості використання даних АСКОЕ для підвищення спостережності РЕМ показали необхідність перетворення агрегованої в часі інформації про споживання електроенергії до функціональної форми графіка навантаження. Для розв'язання цієї задачі запропоновано використання типових графіків навантаження відповідно до видів економічної діяльності споживачів.

2. Запропоновано метод розгортання агрегованої інформації про споживання електроенергії у форму графіка навантаження. Метод ґрунтується на формуванні псевдовимирів осереднених потужностей із використанням типових графіків електроспоживання. Подальша мінімізація відхилень між псевдовимірами та реальними вимірами потужностей у інших вузлах РЕМ виконується методом зважених найменших квадратів та сприяє наближенню псевдовимірів до фактичних значень параметрів електроспоживання. Показано, що розроблений метод можна використати для відновлення втраченої інформації, відбраковування вимірювань та синхронізації агрегованих показів лічильників електроенергії.

3. Перевірку адекватності розробленого методу виконано шляхом зіставлення результатів комп'ютерного моделювання та натурного експерименту для фрагмента реальної РЕМ. За результатами моделювання встановлено, що застосування ТГН та методів оцінювання стану дає змогу відновлювати реальний графік споживання з імовірністю не нижче 95 % за відсутності вимірювань відпуску електроенергії для найбільш навантаженої підстанції.

4. На прикладі фрагмента електромережі показано можливість оптимізації структури вимірювальної підсистеми інформаційної системи РЕМ із застосуванням технології Smart Metering. Однак вплив оснащеності ЕМ засобами обліку електроенергії на адекватність оцінювання режимних параметрів та втрат електроенергії потребує подальших досліджень.

Список використаних джерел

1. A. von Meier, Stewart E., McEachern A., Andersen M. and Mehrmanesh L. Precision Micro-Synchrophasors for Distribution Systems: A Summary of Applications. *IEEE Transactions on Smart Grid*, Nov. 2017. Vol. 8, no. 6. P. 2926-2936. DOI: 10.1109/TSG.2017.2720543.

2. Majumdar A., Agalgaonkar Y. P., Pal B. C. and Gottschalg R. Centralized Volt–Var Optimization Strategy Considering Malicious Attack on Distributed Energy Resources Control. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Jan. 2018. Vol. 9, no. 1. P. 148-156. DOI: 10.1109/TSTE.2017.2706965.

3. Grigoras G., Cartina G., Bobric E. C. and Barbulescu C. Missing data treatment of the load profiles in distribution networks. *2009 IEEE Bucharest PowerTech*. Bucharest, 2009. P. 1-5. DOI: 10.1109/PTC.2009.5282021.

4. Rubanenko O., Hunko I., Rubanenko O., Rassõlkin A. Influence of Solar Power Plants on 0.4 kV Consumers. *2019 IEEE 60th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*, Riga, Latvia, 2019. P. 1-5. DOI: 10.1109/RTUCON48111.2019.8982257.

5. Zhichao L., Yuping Z. Research on Distribution Network Operation and Control Technology Based on Big Data Analysis. *2018 China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*. Tianjin, 2018. P. 1158-1161. DOI: 10.1109/CICED.2018.8592531.

6. Cheng C., Gao H., An Y., Cheng X., Yang J. Calculation method and analysis of power flow for distribution network with distributed generation. *2015 5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT)*. Changsha, 2015. P. 2020-2024. DOI: 10.1109/DRPT.2015.7432571.

7. Brockmeier L., Kromrey J., Hogart K. No randomly Missing Data in Multiple Regression Analysis: An Empirical Comparison of Ten Missing Data Treatments. *Multiple Linear Regression Viewpoints*. 2003. .Vol. 29. P. 8–29.

8. Acuna, Edgar & Rodriguez, Caroline. (2004). The Treatment of Missing Values and its Effect on Classifier Accuracy. 10.1007/978-3-642-17103-1_60.

9. Kim Y., Shin J., Song J., Yang I. Customer clustering and TDLP (typical daily load profile) generation using the clustering algorithm. *2009 Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific*. Seoul, 2009. P. 1-4. DOI: 10.1109/TD-ASIA.2009.5356926.

10. Alimardani A., Therrien F., Atanackovic D., Jatskevich J., Vaahedi E. Distribution System State Estimation Based on Nonsynchronized Smart Meters. *IEEE Transactions on Smart Grid*. Nov. 2015. vol. 6, no. 6. P. 2919–2928. DOI: 10.1109/TSG.2015.2429640.

11. Panapakidis I. P., Papagiannis G. K. Application of the load profiling methodology In Short-Term Bus Load Forecasting. *MedPower 2014*. Athens, 2014. P. 1–8. DOI: 10.1049/cp.2014.1694.

12. Буславець О. А., Квицинський А. О., Кудацький Л. Н., Меженний С. Я., Мойсеєнко Л. В. Типові графіки електричних навантажень у 3D зображенні. *Енергетика та електрифікація*. 2016. № 2. С. 2–12.

13. Концепція побудови автоматизованих систем комерційного обліку електроенергії в умовах енергоринку : затверджена спільним наказом Мінпаливенерго, НКРЕ, Держкоменергозбереження, Держстандарту, Держбуду, Держпромполітики № 32/28/28/276/75/54 від 17 квітня 2000 р. URL: http://search.ligazakon.ua/l_doc2.nsf/link1/FIN4936.html.

14. Кочнева Е. С., Паздерин А. В., Самойленко В. О. Использование методических подходов теории оценивания состояния для расчета и достоверизации потоков электрической энергии в сетях. *Электричество*. 2014. № 10. С. 12–21.

15. Tarafdar Hagh M., Mahaei S. M., Zare K. Improving bad data detection in state estimation of power system. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE).* 2011. Vol. 1, № 2. P. 85–92.

16. Mili L., Phaniraj V., Rousseuw P. J. Least median of squares estimation in power systems. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. 1991. Vol. 6, № 2. P. 325–339.

17. Оценивание состояния в электроэнергетике / А. З. Гамм, Л. Н. Герасимов, И. И. Голуб и др. Москва : Наука, 1983. 302 с.

18. Electric energy systems : analysis and operation / editors: Antonio Gomez-Exposito, Antonio J. Conejo, Claudio Canizares. p. cm. (The electric power engineering series) Includes bibliographical references and index. ISBN 978-0-8493-7365-7 (hardback : alk. paper) 1. Electric power systems. I. Gomez Exposito, Antonio. II. Conejo, Antonio J. III. Canizares, Claudio.

References

1. A. von Meier, Stewart, E., McEachern, A., Andersen, M., and Mehrmanesh, L. (2017). Precision Micro-Synchrophasors for Distribution Systems: A Summary of Applications. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 8 (6), pp. 2926-2936. 10.1109/TSG.2017.2720543.

2. Majumdar, A., Agalgaonkar, Y. P., Pal, B. C., and Gottschalg, R. (2018). Centralized Volt–Var Optimization Strategy Considering Malicious Attack on Distributed Energy Resources Control. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 9(1), pp. 148-156. 10.1109/TSTE.2017.2706965.

3. Grigoras, G., Cartina, G., Bobric, E. C., and Barbulescu, C. (2009). Missing data treatment of the load profiles in distribution networks. *IEEE Bucharest PowerTech*, pp. 1-5. 10.1109/PTC.2009.5282021.

4. Rubanenko, O., Hunko, I., Rubanenko, O., Rassõlkin, A. (2019). Influence of Solar Power Plants on 0.4 kV Consumers. In *2019 IEEE 60th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)* (pp. 1-5). 10.1109/RTUCON48111.2019.8982257.

5. Zhichao, L., and Yuping, Z. (2018). Research on Distribution Network Operation and Control Technology Based on Big Data Analysis. *2018 China International Conference on Electricity Distribution (CICED)* (pp. 1158-1161). 10.1109/CICED.2018.8592531.

6. Cheng, C., Gao, H., An, Y., Cheng, X., Yang, J. (2015). Calculation method and analysis of power flow for distribution network with distributed generation. *2015 5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT)* (pp. 2020-2024). 10.1109/DRPT.2015.7432571.

7. Brockmeier, L., Kromrey, J., and Hogart, K. (2003). No randomly Missing Data in Multiple Regression Analysis: An Empirical Comparison of Ten Missing Data Treatments. *Multiple Linear Regression Viewpoints,* 29, pp. 8–29.

8. Acuna, Edgar & Rodriguez, Caroline. (2004). The Treatment of Missing Values and its Effect on Classifier Accuracy. 10.1007/978-3-642-17103-1_60.

9. Kim, Y., Shin, J., Song, J., and Yang, I. (2009). Customer clustering and TDLP (typical daily load profile) generation using the clustering algorithm. *2009 Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific*, pp. 1-4. 10.1109/TD-ASIA.2009.5356926.

10. Alimardani, A., Therrien, F., Atanackovic, D., Jatskevich, J., and Vaahedi, E. (Nov. 2015). Distribution System State Estimation Based on Nonsynchronized Smart Meters. In *IEEE Transactions on Smart Grid, 6*(6), pp. 2919-2928. 10.1109/TSG.2015.2429640.

11. Panapakidis, I. P., and Papagiannis, G. K. (2014). Application of the load profiling methodology In Short-Term Bus Load Forecasting. *MedPower 2014*, pp. 1-8. 10.1049/cp.2014.1694.

12. Buslavets, O. A., Kvytsynskyi, A. O., Kudatskyi, L. N., Mezhennyi, S. Ya., Moiseienko, L. V. (2016). Typovi hrafiky elektrychnykh navantazhen u 3D zobrazhenni [Typical graphs of electrical loads in a 3D image]. *Enerhetyka ta elektryfikatsiia – Energy and electrification,* 2, pp. 2–12.

13. Kontseptsiia pobudovy avtomatyzovanykh system komertsiinoho obliku elektroenerhii v umovakh enerhorynku [The concept of building automated systems of commercial electricity metering in the energy market]. № 32,28,28,276,75,54 (17.04.2000). http://search.ligazakon.ua/l_doc2.nsf/link1/FIN4936.html.

14. Pazderin, A. V., Egorov, A. O., Kochneva, E. S., & Samojlenko, V. O. (2014). Ispolzovanie metodicheskih podhodov teorii ocenivanija sostojanija dlia rascheta i dostoverizatsii potokov elektricheskoi energii v setiah [The use of methodological approaches of the theory of state estimation for the calculation and verification of electric energy flows in networks]. *Elektrichestvo – Electricity,* 10, pp. 12–21.

15. Tarafdar Hagh, M., Mahaei, S. M., Zare, K. (2011). Improving bad data detection in state estimation of power system. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE), 1*(2), pp. 85–92.

16. Mili, L., Phaniraj, V., Rousseuw, P. J. (1991). Least median of squares estimation in power systems. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, *6*(2), pp. 325–339.

17. Gamm, A. Z., Gerasimov, L. N., Golub, I. I. (1983). *Otsenivanie sostoianiia v jelektrojenergetike [State assessment in the electric power industry]*. Nauka.

18. Antonio Gomez-Exposito, Antonio J. Conejo, Claudio Canizares (Eds.). Electric energy systems : analysis and operation. (The electric power engineering series) Includes bibliographical references and index. ISBN 978-0-8493-7365-7 (hardback: alk. paper) 1. Electric power systems. I. Gomez Exposito, Antonio. II. Conejo, Antonio J. III. Canizares, Claudio.

UDC 621.316

Yurii Tomashevskyi, Oleksander Burykin, Volodymyr Kulyk,
Juliya Malogulko, Vladyslav Hrynyk

DISTRIBUTION ELECTRICAL NETWORK INFORMATION SYSTEM BASED ON THE SMART METERING CONCEPT USING STANDARD LOAD SCHEDULES

Relevance of the research topic. *The use of information systems and databases is becoming an integral part of energy companies. Information on electricity production and consumption is stored in aggregate form. This doesn`t allow to determine the components of the balance costs of electricity by element-by-element calculations and analyze their structure. Thus, the improvement of mathematical and software information systems for electricity metering in order to increase the adequacy of the determination of electricity losses in distribution networks is an urgent task.*

Formulation of the problem. *Equipping distribution networks with means of control of their parameters is often insufficient to solve the problems of planning and maintenance of modes. Therefore, the aim of the study is to analyze the possibility of applying a systems approach to the creation of EDN information systems using data from automated commercial electricity metering systems and other available sources of information to improve the accuracy of modeling network modes and electricity balance components.*

Analysis of recent research and publications. *Today, several approaches are used to check and recover data on electrical loads in ASKOE and Smart Metering systems: 1) Big data technology - data management; 2) global calculation based on non-lost data; 3) statistical methods; 4) artificial neural networks; 5) cluster analysis; 6) application of assessment methods; 7) the use of standard schedules of electrical loads. These approaches can be combined to gain additional benefits.*

Selection of previously unexplored parts of the general problem. *A prerequisite for the use of existing approaches is the availability of don`t lost data. This makes it fundamentally impossible to use known approaches to study the parameters of the EDN mode with acceptable accuracy.*

Setting objectives. *Thus, the main task is to study the possibility of using a systems approach to building EDN information systems using Smart Metering technology, as well as methods and algorithms that, using available information aggregated over time, will determine the parameters of EDN mode with the required accuracy.*

Presenting main material. *To deploy aggregate data in load and generation graphs, it is proposed to use standard graphs of energy exchange of consumers and local energy sources. To reconcile the parameters of the measured mode and pseudo-dimensions, calculated according to typical graphs, it is proposed to use an algorithm based on the method of least squares. Accuracy assessment was performed by comparing power losses for the fully observed network with the results of model calculations.*

Conclusions in accordance with the article*. It is established that the use of standard load and generation schedules makes it possible to restore the energy exchange schedules of consumers and local energy sources with acceptable accuracy. The use of standard load and generation schedules (pseudo-measurements) allows to reduce the cost of distribution network monitoring systems.*

Keywords: *electrical distribution network; electricity balance; electricity losses; restore mode settings; typical load schedule; condition assessment.*

Рис.: 6. Бібл.: 18.

Томашевський Юрій Васильович – директор з інформаційних технологій ПАТ «Вінницяобленерго» (ул. Магістратская, 2, м Вінниця, 21050, Україна).
Tomashevskyi Yurii – Chief Information Officer Vinnitsaoblenergo PJSC (2 Magistratskaya Str., 21050 Vinnitsa, Ukraine).
E-mail: asuyurit@gmail.com
SCOPUS: 57215573402
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1688-8740

Буракін Олександр Борисович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електричних станцій і систем, Вінницький національний технічний університет (Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021, Україна).
Burykin Oleksander – PhD, Associate Professor, Associate Professor in Department of Power Plants and Systems, Vinnitsa National Technical University (95 Khmelnytsky Highway, 21021 Vinnytsia, Ukraine).
E-mail: mr.burykin@gmail.com
SCOPUS Author ID: 55328586100
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0067-3630
ResearcherID: A-9478-2014

Кулик Володимир Володимирович – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри електричних станцій та систем, Вінницький національний технічний університет (Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021, Україна).
Kulyk Volodymyr – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor in Department of Power Plants and Systems, Vinnytsya National Technical University (95 Khmelnytsky Highway, 21021 Vinnytsia, Ukraine).
E-mail: volodymyrvkulyk@gmail.com
SCOPUS Author ID: 56997218000
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7594-5661
ResearcherID: R-1122-2018

Малогулко Юлія Володимирівна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електричних станцій та систем, Вінницький національний технічний університет (Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021, Україна).
Malogulko Juliya – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor in Department of Power Plants and Systems, Vinnytsia National Technical University (95 Khmelnytsky Highway, 21021 Vinnytsia, Ukraine).
E-mail: juliya_malogulko@ukr.net
SCOPUS Author ID: 57193505644
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6637-7391
ResearcherID: I-9097-2018

Гриник Владислав Анатолійович – інженер кафедри електричних станцій та систем, Вінницький національний технічний університет (Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна, 21021)
Hrynyk Vladyslav – engineer in Department of Power Plants and Systems, Vinnytsia National Technical University (95 Khmelnytsky Highway, 21021 Vinnytsia, Ukraine).
E-mail: vladgreen14@gmail.com

УДК 621.311.4.031
DOI: 10.25140/2411-5363-2020-3(21)-242-248

Олег Сінчук, Сергій Бойко, Олексій Городній, Яна Долударєва, Андрій Димерець

МЕТОД ОПТИМІЗАЦІЇ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ГІРНИЧОРУДНИХ ПІДПРИЄМСТВ

Актуальність теми дослідження. *Одним з альтернативних рішень питання другого незалежного джерела живлення електроспоживачів можуть бути використані джерела розосередженої генерації, розташованої на території підприємства, з метою електропостачання відповідальних електроприймачів у аварійних ситуаціях та в інших псевдоаварійних режимах роботи, з метою зменшення витрат за спожиту електроенергію та підвищення рівня надійності електропостачання. Водночас аналіз розподілу потоків споживання електроенергії свідчить, що велика частка електричної енергії припадає саме на локальні енергетичні об'єкти. Це обумовлює загалом актуальність вивчення питання особливостей прогнозування електроспоживання з мережі в умовах підприємств та актуальності застосування при цьому комбінованого підходу, особливо при впровадженні в структуру електропостачання цих підприємств розосередженої генерації.*

Постановка проблеми. *Проблемою цієї роботи є питання підвищення енергоефективності гірничорудних підприємств. До того ж досвід показує, що попри недовантаження електричних потужностей, збитки від аварійних перерв енергозабезпечення з кожним роком зростають.*

Аналіз останніх досліджень і публікацій. *У попередніх авторських дослідженнях було обґрунтовано необхідність оптимізації режимів роботи електричного обладнання гірничорудних підприємств у разі застосування розосередженої генерації. За критеріями економічності та ефективності передбачається формування ефективних режимів в умовах постійного зростання навантаження електроспоживачів та збільшення реальної складової спожитої електричної енергії (ЕЕ), згенерованої при використанні розосередженої генерації. Для досягнення максимального економічного ефекту при застосуванні розосередженої генерації в умовах гірничорудних підприємств, систем керування навантаженням та акумулюючого обладнання, особливо важливим є організація планування електроспоживання, оперативного й оптимального вибору режимів генерації електричної енергії, розосередженої генерації та оперативного керування режимами роботи енергетичного обладнання, яке використовується для забезпечення ефективного й безперебійного функціонування обладнання електроспоживачів гірничорудних підприємств, з метою здешевлення видобування залізорудної сировини, в умовах узгодження режимів роботи джерел генерації гірничорудних підприємств і зовнішньої електромережі.*

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. *Враховуючи складність технологічного процесу та специфіку функціонування гірничих підприємств, актуальним науково-практичним завданням є розробка методу оптимізації режимів роботи енергетичного обладнання залізорудних підприємств при впровадженні в структуру електропостачання цих підприємств розосередженої генерації.*

Постановка завдання. *Таким чином, актуальним науково-практичним завданням є синтез методу оптимізації режимів роботи енергетичного обладнання залізорудних підприємств при впровадженні в структуру їх електропостачання розосередженої генерації. Це дозволить ефективно впроваджувати джерела розосередженої генерації в структури електропостачання гірничорудних підприємств.*

Виклад основного матеріалу. *Враховуючи те, що на підприємствах актуальним є впровадження в загальну структуру систем електроживлення розосередженої генерації, запропоновано впровадження відновлюваних джерел енергії. Між тим, що не менш важливо, досвід показує, що незважаючи на недовантаження електричних потужностей, збитки від аварійних перерв енергозабезпечення з кожним роком зростають. Кожний параметр загальної оптимізації вибору режимів роботи енергетичного обладнання гірничорудних підприємств має різний ступінь впливу. Тому для вироблення оптимальних режимів роботи джерел розосередженої генерації в умовах гірничорудних підприємств за критеріями економічності та ефективності, пропонуємо використати запропоновану цільову функцію.*

Висновки відповідно до статті. *На гірничорудних підприємствах актуальним та можливим є впровадження в загальну структуру систем електроживлення розосередженої генерації на базі відновлюваних джерел енергії. Водночас з метою достатньо енергоефективного використання таких мініелектростанцій у структурах систем електроживлення необхідно ґрунтовно аналізувати питання, пов'язані з режимами роботи енергетичного обладнання цих підприємств. Запропонований метод дозволяє оптимізувати роботу енергетичного обладнання гірничорудних підприємств при впровадженні до структури їх електропостачання розосередженої генерації.*

Ключові слова: *розосереджена генерація; енергетичне обладнання; електропостачання гірничорудних підприємств; оптимізація режимів роботи.*

Табл.: 1. Бібл.: 9.

Постановка проблеми. Зважаючи на реалії сьогодення, питання підвищення енергоефективності гірничорудних підприємств (ГРП) є актуальним. До того ж досвід показує, що незважаючи на недовантаження електричних потужностей, збитки від аварійних перерв енергозабезпечення з кожним роком зростають.

Одним з альтернативних рішень питання другого незалежного джерела живлення електроспоживачів можуть бути використані джерела розосередженої генерації, розташовані на території підприємства, з метою електропостачання відповідальних електроприймачів у аварійних ситуаціях та в інших псевдоаварійних режимах роботи, з метою зменшення витрат за спожиту електроенергію та підвищення рівня надійності електропостачання.

© Сінчук О. М., Бойко С. М., Городній О. М., Долударєва Я. С., Димерець А. В., 2020

Водночас аналіз розподілу потоків споживання електроенергії свідчить, що велика частка електричної енергії припадає саме на локальні енергетичні об'єкти, що зумовлює загалом актуальність вивчення питання особливостей прогнозування електроспоживання з мережі в умовах підприємств та актуальності застосування при цьому комбінованого підходу, особливо при впровадженні в структуру електропостачання цих підприємств розосередженої генерації (РГ) [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У попередніх дослідженнях авторами обґрунтовано необхідність оптимізації режимів роботи електричного обладнання ГРП при застосуванні РГ. За критеріями економічності та ефективності передбачається формування ефективних режимів в умовах постійного зростання навантаження електроспоживачів та збільшення реальної складової спожитої електричної енергії (ЕЕ), згенерованої при використанні РГ [2-9].

Для досягнення максимального економічного ефекту при застосуванні РГ в умовах ГРП, систем керування навантаженням та акумулюючого обладнання (ГАЕС, АБ), особливо важливим є організація планування електроспоживання, оперативного й оптимального вибору режимів генерації ЕЕ РГ в умовах ГРП (шахт або кар'єрів) та оперативного керування режимами роботи енергетичного обладнання (ЕО), яке використовується для забезпечення ефективного та безперебійного функціонування обладнання електроспоживачів ГРП, з метою здешевлення видобування залізорудної сировини (ЗРС), в умовах узгодження режимів роботи джерел генерації ГРП і зовнішньої електромережі.

Визначення недосліджених частин загальної проблеми. Отже, актуальним науково-практичним завданням є розробка методу оптимізації режимів роботи енергетичного обладнання залізорудних підприємств при впровадженні в структуру електропостачання цих підприємств РГ.

Мета статті. Головною метою цієї роботи є розробка методу оптимізації режимів роботи енергетичного обладнання залізорудних підприємств при впровадженні в структуру електропостачання цих підприємств РГ.

Виклад основного матеріалу. З метою вироблення оптимізованих режимів ЕО ЗРП, необхідно виділити основні, найбільш ефективні складові, які безпосередньо впливають на рівень оптимізації в цілому, тобто фактори впливу (α_i) та сформулювати їх зміст, визначивши ступінь впливу (прояву) на процес оптимізації. В умовах ЗРП при застосуванні РГ можна виділити найбільш впливові фактори, кожний з яких залежить від критеріїв β_i^j, які визначають ступінь впливу цього фактору на визначення оптимальних режимів роботи ЕО в умовах ЗРП.

Водночас необхідно визначитись у способах застосування кожного окремо взятого джерела ЕЕ, його розташуванні та їхніх параметрах, економічній доцільності використання РГ в умовах ГРП. Отже, задача оптимізації безпосередньо залежить від типу РГ, її параметрів, кількості, місць розташування, режимів використання, в залежності від умов вироблення (видобутку) ЗРС, параметрів атмосфери, сезонів року, тарифних зон доби, впливу зовнішніх факторів на споживання і генерацію ЕЕ, а також рівня впливу РГ на екологію оточуючого середовища, з метою зменшення негативного впливу на стан атмосферного повітря, швидкості руху повітряних мас, на міграцію птахів, електромагнітне випромінювання в усіх діапазонах (СВЧ, ВЧ, СЧ, НЧ, УКВ) збереження біофлори, біоценозу на території розміщення РГ, мінімізація забруднення водних артерій, зменшення впливу на ерозію поверхні, зміну рівня ґрунтових вод та заболочення прилеглих територій та інше [8].

Тому необхідно врахувати типи і кількість РГ та можливий вплив на вироблення оптимальних і ефективних режимів роботи ЕО ГРП, а саме вплив кожного джерела генерації ЕЕ (γ_{ij}^{g}) та режимів використання РГ ($l = 1, p,$ де p – кількість режимів).

Кожний параметр загальної оптимізації вибору режимів роботи ЕО ЗРП має різний ступінь впливу (прояву, важливості). Тому для вироблення оптимальних режимів роботи РГ в умовах ГРП за критеріями економічності та ефективності пропонуємо використати цільову функцію загального виду:

$$0 \prec F_i^{jq}(n,m,k,p,\mu_{\alpha_i},\beta_i^j,\gamma_{ij}^q) = \frac{1}{n\cdot m\cdot k}\sum_{i,j,q,l=1}^{\substack{l=p\\q=k\\j=m\\i=n}}(\mu_{\alpha_i}\cdot\beta_{ijl_{cp}}^q\cdot\gamma_{ijq_{cp}}^l\cdot) =$$

$$= \frac{1}{n\cdot m\cdot k}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}\sum_{q=1}^{k}\mu_{\alpha_i}\left(\frac{1}{k}\cdot\sum_{i,j,q,l=1}^{\substack{l=p\\q=k\\j=m\\i=n}}\beta_{ijl_{cp}}^q\right)\left(\frac{1}{p}\sum_{l=1}^{p}\gamma_{ijq}^l\right)\prec 1$$

де α_i – і-й фактор,

β_i^j – рівень впливу j-го критерію і-го фактору;

γ_{ij}^q – рівень впливу в і-му факторі, j-му критерії;

$l = 1, n, n$ – кількість факторів,

$l = 1, m, m$ – кількість критеріїв,

$q = \overline{1,k}$, k – кількість обладнання (ДРГ) ЕО $l = 1, p, p$ – кількість режимів прояву критерію даного фактора.

Примітка. αi можуть бути рівнозначні, тоді $\mu_{ai} = \frac{1}{n}, 0 < \mu_{ai} < 1, \sum_{i=1}^{n}\mu_{ai} = 1$.

Якщо αi не рівнозначні, то ступінь їх важливості μi визначають у відсотках (%) записаних десятковим дробом $\mu_{ai} \in [0;1), \beta_i^j \in [0;1], \lambda_{ij}^q \in (0;1)$.

З метою з'ясування ступеня важливості кожного фактору на оптимізацію вибору режиму роботи ЕО ЗРП, обмежують проміжні цільові функції (ПЦФ):

$$\varphi_{ij}^{ql}(\beta_{ij}^{lq},\gamma_{ij}^{ql}) = \frac{1}{n\cdot m\cdot k}\sum_{q,l=1}^{\substack{l=p\\q=k}}\left(\mu_{ai}\cdot\beta_{ij_{cp}}^{lq},\gamma_{ij_{cp}}^{ql}\right),\ j=\overline{1,m},\ j=\overline{1,k},\ j=\overline{1,p},$$

де i – номер фактору,

j – номер критерію і-го фактору;

q – номер електрообладнання (джерела ЕЕ),

p – кількість режимів в j-му критерії в і-му факторі,

n – кількість факторів,

m – кількість критеріїв,

k – кількість обладнання, яке споживає (генерує) ЕЕ,

l – кількість режимів в j-му критерії і-го фактору [4].

Якщо фактори αі рівнозначні, то $\mu_{\alpha i}$ мають рівні числові значення, які можна обчислити за формулою $\mu_{ai} = \frac{1}{n}$. Для спрощення обчислення можна прийняти кожне $\mu_{\alpha i}$ рівними одиниці, тобто $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_n = \ldots = 1$. Якщо $\mu_{\alpha i}$ обчислюють, то одержують числові значення у вигляді десяткових дробів, причому $0 < \mu_{ai} < 1, \sum_{i=1}^{n}\mu_{ai} = 1$.

Якщо фактори αі нерівнозначні (рівні прояву (впливу)) різні, то ступінь їх важливості (μi) визначають у відсотках (%), які записують у вигляді десяткових дробів, причому $0 < \mu_{ai} < 1$.

Для обчислення числових значень $\beta_{i_{cp}}^{jl}, \gamma_{ij_{cp}}^{l}$ необхідно скласти таблицю для кожного критерію відповідного фактору, визначивши режими по кожному критерію для всіх типів обладнання, визначивши значення вагових коефіцієнтів по кожному режиму для кожного типу обладнання. У таблиці по горизонталі розміщують типи обраного обладнання ($q = \overline{1,k}$, кількість ЕО), а по вертикалі, для кожного критерію, номера режимів $l = \overline{1,p}$, p – кількість режимів, що відповідають цьому критерію.

Наприклад, якщо $i = 2$, $j = 1$, $q = 5$, $p = 3$, тобто для 2-го фактору, 1-го критерію, із трьома режимами, для п'яти типів обладнання, матимемо вигляд таблиці.

Таблиця

Режими роботи обладнання

Обладнання		q_1	q_2	q_3	q_4	q_5	…	q_k
Режими \ γ_{cp}		$\gamma_{211_{cp}}^{l}$	$\gamma_{212_{cp}}^{l}$	$\gamma_{213_{cp}}^{l}$	$\gamma_{214_{cp}}^{l}$	$\gamma_{215_{cp}}^{l}$	…	$\gamma_{21k_{cp}}^{l}$
$(\phi)\ (кр)1$ $\alpha_2(\beta_2)$	l_1	γ_{211}^{1}	γ_{212}^{1}	γ_{213}^{1}	γ_{214}^{1}	γ_{215}^{1}	…	γ_{21k}^{1}
	l_2	γ_{211}^{2}	γ_{212}^{2}	γ_{213}^{2}	γ_{214}^{2}	γ_{215}^{2}	…	γ_{21k}^{2}
	l_3	γ_{211}^{3}	γ_{212}^{3}	γ_{213}^{3}	γ_{214}^{3}	γ_{215}^{3}	…	γ_{21k}^{3}
	…	…	…	…	…	…	…	…
	l_p	γ_{211}^{p}	γ_{212}^{p}	γ_{213}^{p}	γ_{214}^{p}	γ_{215}^{p}	…	γ_{21k}^{p}

$A_{ijq}^{1} = \begin{pmatrix} q_1 l_1 & \dots & q_1 l_p \\ \dots & \dots & \dots \\ q_k l_1 & \dots & q_k l_p \end{pmatrix}$ – в/к обладнання відносно режимів роботи ЕО β_i^j критерій, α_i фактора, де $q_1 l_1 = \gamma_{ijq1}^{l1}, \dots$

Тобто по вертикалі утворюються кортежі для кожного типу обладнання для q_1: $\{\gamma_{ijq1}^{l1}; \gamma_{ijq1}^{l2}; \gamma_{ijq1}^{l3} \dots\}$; q_2: $\{\gamma_{ijq2}^{l1}; \gamma_{ijq2}^{l2}; \gamma_{ijq2}^{l3} \dots\}$; q_k: $\{\gamma_{ijqk}^{l1}; \gamma_{ijqk}^{l2}; \gamma_{ijqk}^{l3} \dots\}$.

Потім знаходять середнє значення вагових коефіцієнтів кожного кортежу для кожного номера обладнання, утворивши кортеж середніх значень вагових коефіцієнтів для всіх номерів обладнання за формулою:

$$\gamma_{ijq_1 cp}^{l_{1-p}} = \frac{1}{p}\sum_{l=1}^{p}\gamma_{ijq_1}^{l} = \frac{1}{p}(\gamma_{ijq1}^{l1} + \gamma_{ijq1}^{l2} + \gamma_{ijq1}^{l3} + \dots)$$

Аналогічно для кожного типу ЕО (q_k): $q_1, \dots, q_k$: $\{\gamma_{ijq1cp}^{l_{1-p}}; \gamma_{ijq2cp}^{l_{1-p}}; \gamma_{ijq3cp}^{l_{1-p}} \dots \gamma_{ijqkcp}^{l_{1-p}}\}$.

Потім знаходять середнє сумарне загальне значення по всіх режимах і типах обладнання за формулою:

$$\gamma_{ijq_{1-k\,cp\Sigma}}^{l_{1-p}} = \frac{1}{k}\sum_{\substack{l=1 \\ q=1}}^{\substack{l=p \\ q=k}}\gamma_{ijq} = \frac{1}{k}\cdot\frac{1}{p}(\gamma_{ijq1cp}^{l_{1-p}} + \gamma_{ijq2cp}^{l_{1-p}} + \gamma_{ijq3cp}^{l_{1-p}} + \dots + \gamma_{ijqkcp}^{l_{1-p}})$$

Для кожного і-го фактору, j-го критерію, по всіх режимах l, для всіх типів обладнання q середнє значення вагових коефіцієнтів (по вертикалі). Аналогічно проводять обчислення числових середніх значень вагових коефіцієнтів для всіх режимів і типів обладнання по горизонталі. При чому числові значення вагових коефіцієнтів в кожній клітинці таблиці є однаковими як для $\gamma_{ijq1}^{l_1}$, так і для $\beta_{ijl_1}^{q_1}$, тобто $\gamma_{ijq1}^{l_1} = \beta_{ijl_1}^{q_1}$, які знаходяться в інтервалі [0;1], визначаються експертним шляхом [9].

Загальний вигляд оптимізації режимів роботи обладнання:

$$K_{ijlq} = \begin{pmatrix} \alpha_1\beta_1 l_1 q_1 & \dots & \alpha_1\beta_1 l_1 q_2 & \dots & \alpha_1\beta_1 l_1 q_k & \dots & \alpha_1\beta_1 l_2 q_1 & \dots & \alpha_1\beta_1 l_2 q_k & \dots & \alpha_1\beta_1 l_p q_k & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \alpha_n\beta_1 l_1 q_1 & \dots & \alpha_n\beta_1 l_1 q_2 & \dots & \alpha_n\beta_1 l_1 q_k & \dots & \alpha_n\beta_1 l_2 q_1 & \dots & \alpha_n\beta_1 l_2 q_k & \dots & \alpha_n\beta_1 l_p q_k & \dots \end{pmatrix}$$

$$\alpha_8(\beta_8^j) \to \min$$

Висновки відповідно до статті. 1. На гірничорудних підприємствах актуальним та можливим є впровадження в загальну структуру систем електроживлення розосередженої генерації на базі відновлюваних джерел енергії. Водночас з метою достатньо енергоефективного використання таких мініелектростанцій у структурах систем електроживлення необхідно ґрунтовно аналізувати питання, пов'язані із режимами роботи енергетичного обладнання цих підприємств.

2. Запропонований метод дозволяє оптимізувати роботу енергетичного обладнання гірничорудних підприємств при впровадження до структури їх електропостачання розосередженої генерації.

Список використаних джерел

1. Синчук О. Н., Синчук И. О., Гузов Э. С., С. М. Бойко, Яловая А. Н. Энергоэффективность железорудных производств. Оценка, практика повышения : монография. Кременчуг : LAP LAMBERT Academic Publishing is managed by OmniScriptum Management GmbH., 2016. 346 с.

2. Сінчук О. М., Сінчук І. О., Бойко С. М., Караманиць Ф. І., Ялова О. М., Пархоменко Р. О. Відновлювані джерела електричної енергії в структурах систем електропостачання залізорудних підприємств. (Аналіз, перспективи, проекти) : монографія. Кривий Ріг : Видавництво ПП Щербатих О. В., 2017. 152 с.

3. Shumilova G. P., Gotman N. E., Startceva T. B. Electrical load forecasting using an artificial intelligent methods. *RNSPE*, 10-14 September, 2001, Proceedings. Kazan : Kazan State Power Eng. University, 2001. Vol. I. Pp. 440–442.

4. Baumann T., Germond A. Application of the Kohonen Network to Short-Term Load Forecasting. IEEE 0-7803-1217-1. 1993. Pp. 407–412.

5. Кузнєцов М. П. Методи оцінки випадкових параметрів роботи енергосистем з інтегрованими вітровими електростанціями. *Відновлювана енергетика*. 2014. № 1. С. 59–64.

6. Buchholz B., Styczynski Z. Smart Grids Fundamentals and Technologies in Electricity Networks, Springer 2014. 396 p.

7. Shumilova G. P., Gotman N. E., Startceva T. B. Electrical load forecasting using an artificial intelligent methods. *RNSPE*, 10-14 September, 2001, Proceedings. Kazan : Kazan State Power Eng. University, 2001. Vol. I. Pp. 440–442.

8. Bayir R., Bay O. F. Kohonen Network based fault diagnosis and condition monitoring of serial wound starter motors. *International Journal of Automotive Technology*. 2005. Vol. 6, No. 4. Pp. 341−350.

9. Charytoniuk W., Chen M. S. Short-term Forecasting in Power Systems Using a General Regression Neural Network. *IEEE Trans. on Power Systems*. 1995. Vol. 7. № 1.

References

1. Sinchuk, O. N., Sinchuk, I. O., Guzov, E. S., Boiko, S. M., Ialovaia A. N. (2016). *Enerhoeffektivnost zhelezorudnykh proizvodstv. Otsenka, praktika povysheniia [Energy efficiency of iron ore productions. Assessment, practice of improvement].* LAP LAMBERT Academic Publishing is managed by OmniScriptum Management GmbH.

2. Sinchuk, O. M., Sinchuk, I. O., Boiko, S. M., Karamanyts, F. I., Yalova, O. M., Parkhomenko, R. O. (2017). *Vidnovliuvani dzherela elektrychnoi enerhii v strukturakh system elektropostachannia zalizorudnykh pidpryiemstv. (Analiz, perspektyvy, proekty) [Renewable energy sources in the structures of power supply systems of iron ore enterprises. (Analysis, prospects, projects)].* Vydavnytstvo PP Shcherbatykh O. V.

3. Shumilova, G. P., Gotman, N. E., Startceva, T. B. (10-14 September, 2001). Electrical load forecasting using an artificial intelligent methods. *RNSPE*. Kazan State Power Eng. University (pp. 440–442). (Vol. I).

4. Baumann, T., Germond, A. (1993). Application of the Kohonen Network to Short-Term Load Forecasting. *IEEE* 0-7803-1217-1 (pp. 407–412).

5. Kuznietsov, M. P. (2014). Metody otsinky vypadkovykh parametriv roboty enerhosystem z intehrovanymy vitrovymy elektrostantsiiamy [Methods for estimating random parameters of power systems with integrated wind power plants]. *Vidnovliuvana enerhetyka – Renewable energy*, 1, pp. 59–64.

6. Buchholz, B., Styczynski, Z. (Springer 2014). Smart Grids Fundamentals and Technologies in Electricity Networks.

7. Shumilova, G. P., Gotman, N. E., Startceva, T. B. (10-14 September, 2001). Electrical load forecasting using an artificial intelligent methods. *RNSPE*. Kazan State Power Eng. University (pp. 440–442) (Vol. I).

8. Bayir, R., Bay, O. F. (2005). Kohonen Network based fault diagnosis and condition monitoring of serial wound starter motors. *International Journal of Automotive Technology*, *6*(4), pp. 341−350.

9. Charytoniuk, W., Chen, M. S. (1995). Short-term Forecasting in Power Systems Using a General Regression Neural Network. *IEEE Trans. on Power Systems*, *7*(1).

UDC 621.311.4.031

Oleg Sinchuk, Serhii Boiko, Oleksiy Gorodny, Yana Doludarieva, Andrii Dymerets

METHOD OF OPTIMIZATION OF OPERATING MODES OF ENERGY EQUIPMENT OF MINING ENTERPRISES

Urgency of the research. *One of the alternative solutions to the second independent power supply of electricity consumers can be used sources of distributed generation located on the territory of the enterprise, in order to supply responsible electrical receivers in emergency situations and other pseudo-emergency modes, to reduce electricity costs and increase reliability. At the same time, the analysis of the distribution of electricity consumption flows shows that a large share of electricity falls on local energy facilities, which determines the general relevance of studying the peculiarities of forecasting electricity consumption from the grid in enterprises and the relevance of the combined approach, especially in implementing the structure of power supply of these enterprises of dispersed generation.*

Actual scientific researches and issues analysis. *In a number of previous studies, the authors substantiate the need to optimize the operation of electrical equipment of mining enterprises using distributed generation, according to the criteria of economy and efficiency provides for the formation of efficient modes in a constantly increasing load of consumers and increasing the real component To achieve maximum economic effect when using distributed generation in mining enterprises, load control systems and storage equipment, it is especially important to organize the planning of electricity consumption, operational and optimal choice of modes of electricity generation of distributed generation in mining enterprises and operational control of equipment operating modes. which is used to ensure efficient and uninterrupted operation of the equipment of electric consumers of mining enterprises, in order to reduce the cost of extraction of iron ore, in terms of coordination of modes of operation of sources of generation of mining enterprises and the external grid.*

Uninvestigated parts of general matters defining. *Given the complexity of the technological process and the specifics of the operation of mining enterprises, an urgent scientific and practical task is to develop a method for optimizing the operation of iron ore power equipment during the introduction into the power supply structure of these enterprises of dispersed generation.*

The research objective. *Thus, the actual scientific and practical task is the synthesis of a method for optimizing the modes of operation of iron ore power equipment when introducing distributed generation into the power supply structure of these enterprises, which will effectively implement distributed generation sources in the power supply structure of mining enterprises.*

The statement of basic materials. *Given the fact that the enterprises are relevant to the introduction into the overall structure of power supply systems of distributed generation, the introduction of renewable energy sources is proposed. Meanwhile, not least, experience shows that despite the underutilization of electricity capacity, losses from emergency power outages are growing every year. Each parameter of the general optimization of the choice of operating modes of power equipment of mining enterprises has a different degree of influence. Therefore, to develop optimal modes of operation of sources of dispersed generation in the conditions of mining enterprises according to the criteria of economy and efficiency, we propose to use the proposed target function.*

Conclusions. *At mining enterprises, the introduction of dispersed generation power supply systems based on renewable energy sources is relevant and possible. At the same time, in order to sufficiently energy-efficient use of such mini-power plants in the structures of power supply systems, it is necessary to thoroughly analyze issues related to the modes of operation of power equipment of these enterprises. The proposed method allows to optimize the operation of power equipment of mining enterprises in the introduction into the structure of their power supply of dispersed generation..*

Keywords: *dispersed generation; power equipment; power supply of mining enterprises; optimization of operating modes. Table: 1. References: 9.*

Сінчук Олег Миколайович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматизованих електромеханічних систем в промисловості та транспорті, Криворізький національний університет (вул. Віталія Матусевича, 11, м. Кривий Ріг, 50027, Україна).
Sinchuk Oleg – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Automation Electromechanical Systems in the Industry and Vehicles, Kryvyi Rih National University (11 Vitalyy Matusevych Str., 50027 Kryvyi Rih, Ukraine).
E-mail: speet@ukr.net
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-7621-9979
ResearcerID: https://www.researchgate.net/profile/Oleg_Sinchuk

Бойко Сергій Миколайович – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизованих електромеханічних систем в промисловості та транспорті, Криворізький національний університет (Криворізький національний університет (вул. Віталія Матусевича, 11, м. Кривий Ріг, 50027, Україна).
Boiko Serhii – PhD in Technical Sciences, associate professor of Department of automation electromechanical systems in the industry and vehicles Kryvyi Rih National University (11 Vitalyy Matusevych Str., 50027 Kryvyi Rih, Ukraine).
E-mail: bsn1987@i.ua
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9778-2202
Scopus ID: 56417478200

Городній Олексій Миколайович - кандидат технічних наук, доцент кафедри електроніки, автоматики, робототехніки та мехатроніки, Національний університет «Чернігівська політехніка» (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).
Gorodny Oleksiy – PhD in Technical Sciences, Associate Professor of Department of Electronics, Automation, Robotics and Mechatronics, Chernihiv Polytechnik National University (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).
E-mail: aleksey.gorodny@gmail.com
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-5303-9564
Web of Science: H-1425-2016
Scopus ID: 56338229500.

Долударєва Яна Станіславівна – викладач вищої категорії, викладач-методист, голова циклової комісії природничих наук, кандидат технічних наук, доцент, Кременчуцький льотний коледж Харківського національного університету внутрішніх справ (вул. Перемоги, 17/6, м. Кременчук, 39600, Україна).
Doludarieva Yana – Lecturer of the highest category, teacher-methodologist, Chairman of the Cycle Commission of Natural Sciences, PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Kremenchuk Flight College Kharkiv National University of Internal Affairs (17/6 Peremohy Str., 39600 Kremenchuh, Ukraine).
E-mail: boikosn2017@gmail.com
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-4089-2010

Димерець Андрій Віталійович – аспірант кафедри електроніки, автоматики, робототехніки та мехатроніки, Національний університет «Чернігівська політехніка» (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).
Dymerets Andrii – PhD student of Department of Electronics, Automation, Robotics and Mechatronics, Chernihiv Polytechnik National University (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).
E-mail: andrey.dymerets@gmail.com
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-7617-5291
Scopus ID: 57204287360

Сінчук О., Бойко С., Городній О., Долударєва Я., Димерець А. Метод оптимізації режимів роботи енергетичного обладнання гірничорудних підприємств. *Технічні науки та технології.* 2020. № 3 (21). С. 242-248.

UDC 620.17
DOI: 10.25140/2411-5363-2020-3(21)-249-258

Patrik Šarga, Martin Studený

POSSIBILITIES OF STRESS MEASUREMENT IN STRUCTURES USING MODERN TECHNOLOGIES

Urgency of the research. *In many industrial areas, knowledge of deformation stresses in materials is required. Mainly for safety, continuous monitoring of the condition, the maintenance planning, overall prediction of the service life of structures, as well as for other reasons aimed at saving money and time required for repairs.*

Target setting. *The research aimed to create a "low-cost" monitoring device for monitoring the stresses in the structure, created on the principle of IoT.*

Actual scientific researches and issues analysis. *When designing the system and preparing this paper, we considered both current sources – publications and papers dealing with the current state of development of the monitoring IoT systems as well as existing solutions, which are available on the market.*

Uninvestigated parts of general matters defining*. The mobile application was not implemented at this stage. It will be implemented in the next stage of development.*

The research objective. *The purpose of this article is to explain how we can create own IoT monitoring system by using Arduino platform.*

The statement of basic materials. *In our work were used components from Arduino, which is the world's leading open-source hardware and software ecosystem. The company offers a range of software tools, hardware platforms and documentation enabling almost anybody to be creative with technology.*

Conclusions. *The created IoT monitoring device was created on the Arduino platform. The software part was implemented in the Arduino IoT Cloud environment. Testing of the device has proven its functionality during the practical deployment of the created system. It is possible to modify it to best suit the specified requirements.*

Keywords: *Arduino; Raspberry Pi (RPi) Internet of things (IoT); strain gauges; Arduino IoT Cloud.*
Fig.: 13. References: 16.

Introduction. Monitoring of deformation stresses is an important part not only of industrial production but also of many other sectors. It is essential to know the stress of structures in terms of preventing possible failures, predicting the residual life of the material, etc. [1; 2].

Our goal is to create a device for monitoring stresses in the structure by the strain gauge method. Such a solution would be suitable for long-term monitoring of the condition of the structure (bridges, cranes, and others). The proposed solution is based on the IoT principle. The device should be single-purpose, i.e. it should detect the deformation on the selected structure, which is then converted to stress (bending, compressive or other). At the same time, it should be inexpensive, with low consumption and must allow remote monitoring of the current state of the monitored structure. The Arduino platform is sufficient for this task. We decided to use a board from the Arduino MKR 1000 family. The choice of a specific type depends on the communication interface on which we want to implement data collection (Wi-Fi, Sigfox, LoRaWAN, GSM module or other). We chose the MKR 1010 board, which contains a Wi-Fi module [3].

Professional solutions from HBM. Commercially available systems for measuring stresses in a structure using strain gauge measurement have their negatives. Conventional devices used so far are not suitable for remote monitoring of stresses in the structure. The next generation of measuring systems meets this requirement, but the problem is the high price. That is why we were looking for our own, reliable and affordable solution.

Currently, there are several types of professional measuring devices in the world from various manufacturers for strain gauge measurements of mechanical quantities. We will focus on equipment from HBM company, which is a leader in the field of measurement technology and has a comprehensive portfolio of products needed for the implementation of strain gauges (sensors, apparatus, software, and others).

Quantum X is a universal, accurate and reliable system for measuring various physical quantities. It is compatible with HBM sensors and Catman software and provides a comprehensive solution for measuring and testing structures. Quantum X family measuring devices are also designed for standard local strain gauge measurements, and some models also allow synchronization via FireWire or Ethernet, as shown in the Quantum X modular concept (Fig. 1) [4].

© Патрик Шарга, Мартін Студений, 2020

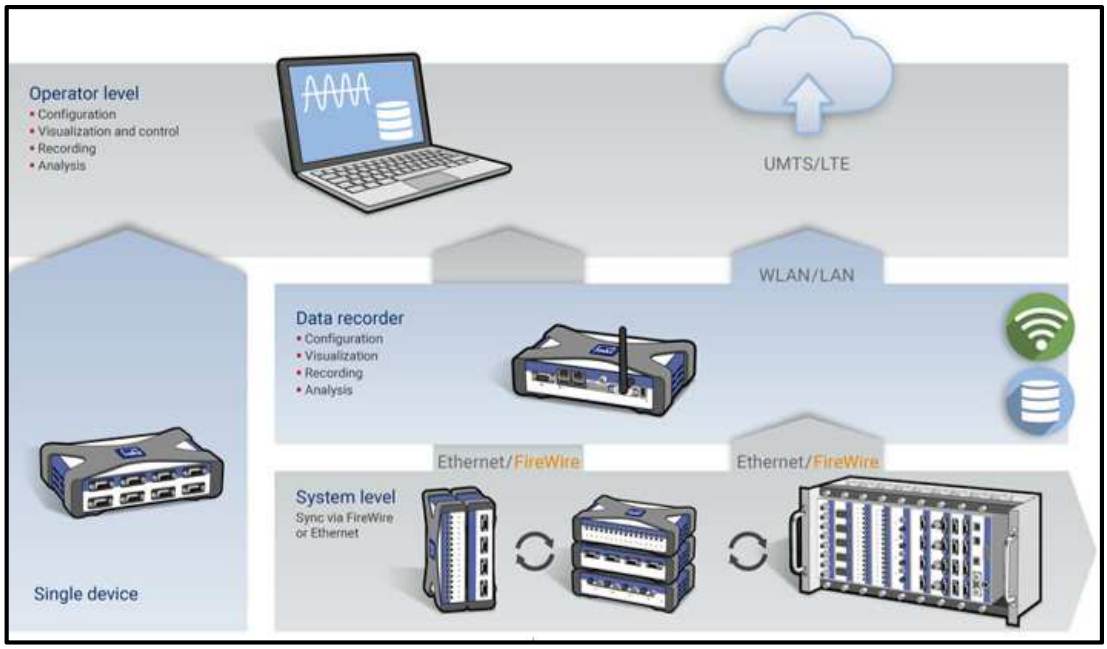


Fig. 1. Quantum X [4]

Such a solution allows us to a certain level of remote monitoring of measured data, but it is not built for cloud monitoring.

Another option is the PMX device from HBM (Fig. 2), which is also an accurate, reliable and efficient measuring device. It is a multi-channel system that is designed for the collection and processing of large amounts of data. It is equipped with interfaces (Profinet, EtherCAT, Ethernet IP, TCP/IP) [5].



Fig. 2. PMX [5]

The PMX can be flexibly expanded with practical plug-in cards for different types of measurements to suit specific needs. Technical data on expansion plug-in cards are given in the source [5]. It is also possible to configure PMX and monitor the required quantities using the web interface (Fig. 3). Such a solution already meets the requirement of IoT, but the main disadvantage of this system is its high price [5].



Fig. 3. Web interface of PMX [5]

Solutions from Embedded Micro Technology. In the next section, we will introduce commercial solutions based on the low-cost platforms Arduino and Raspberry Pi.

Raspberry Pi development boards are often seen only as platforms for the agile development of prototypes of electronic devices for educational and experimental purposes. Possibilities of their usage in the industrial environment are often underestimated, or they are used only in the field of development. However, this practice is gradually changing, and some companies have launched industrial versions of Raspberry Pi development boards. The flexibility of their programming and their easy adaptation to existing installations can bring several benefits to industries. They can be used either as low-cost alternatives to traditional industrial automation and control systems or to extend the functions of older industrial systems, e.g. the possibility of remote monitoring. Among the companies that offer devices based on RPi is the company Embedded Micro Technology, which develops industrial integrated boards "MyPi" usable also for IoT [6].

The MyPi (Industrial IoT Integrator Board) (Fig. 4) is specially designed for the industrial market, providing a powerful and easy-to-use platform. It contains a CPU based on the RPi computing module with broad OS support and easy integration into the cloud services of the Internet of Things. The integrated platform has an IO interface and several built-in cards for standard network protocols such as e.g. (Modbus, CAN, RS485 and many more) [6].

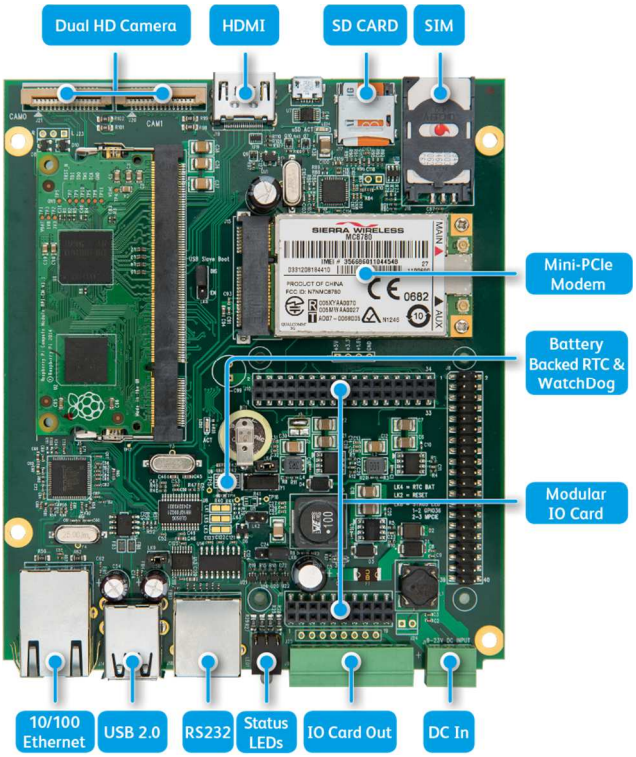


Fig. 4. Industrial IoT Integrator Board (MyPi) [6]

Solutions by Industrial Shields. Another possible solution is offered by the company Industrial Shields, which focuses on the construction of PLCs based on the Arduino platform, but also RPi.

PLCs created on the Arduino platform offer solutions based on Arduino Leonardo or Arduino Mega boards (Fig. 5). The choice of board used depends on the requirements of the system. There are several communication interfaces to choose from (Wi-Fi, GPRS, LoRa, DALI), protocol support (RS485, RS232, SPI, I2C, Modbus RTU). It is also possible to choose a solution that will contain multiple, up to 20 I/O (digital, analogue, relay). [7]



Fig. 5. PLC based on Arduino [7]

A more robust solution from Industrial Shields is based on the RPi board (Fig. 6). Compared to Arduino, it offers higher performance, multiprocessing, a Linux based operating system, multiple connectivities. Thanks to the dual Ethernet ports, the dual RS-485, Wi-Fi, Bluetooth, CAN bus and other options, it is possible to connect to a large number of devices and to use multiple protocols and communication ports. These parameters also result in higher energy consumption, which is still lower compared to the PMX system from HBM.

The standard programming environment Arduino IDE, Python, Node-RED and similar can be used to program these PLCs.



Fig. 6. PLC based on RPi [7]

Our solution. Since our goal was to create a monitoring system at the lowest possible price without the need for high performance, the choice was to create the original system, built on the Arduino platform.

Arduino boards contain a built-in processor, built-in RAM, without the possibility of expansion. They are designed for repetitive tasks (e.g. monitoring soil moisture, opening and closing garage doors, controlling lighting, controlling small devices such as sensors, motors, lights, and others). They are suitable for tasks that do not require a large amount of memory and such a powerful processor.

Arduino boards´ main advantage is that they can be in continuous operation, as energy from an external source, such as a power bank, is sufficient for their operation. That allows them to be used out of reach of the mains. Arduino boards are built on an open-source platform. The Arduino platform offers several types of development boards with different features as well as large expansion add-on boards [8].

Because our goal was to create an IoT solution, we have chosen an Arduino board from the MKR 1000 family, which also has a built-in communication protocol. Since we wanted to use the Wi-Fi interface, we chose the MKR WiFi 1010 version [9].

The Arduino MKR 1010 (Fig. 7) is a compact and powerful board based on the Atmel ATSAMW25 SoC (System on Chip) chip, which is part of the "Smart Connect family of Atmel Wireless devices" specially designed for IoT solutions. It includes a reliable 32-bit Arm Cortex –M0+ computing processor, a wide range of I/O interfaces and low-energy Wi-Fi technology with an encryption function for secure communication. The construction of the board further consists of a Li-Po charging circuit, which can work on an external 5V battery or by powering directly via the micro USB port on the board. Unlike other boards, it can operate with a minimum supply voltage of 3.3V, and its output pins continue to give an output voltage of 5V. It can detect the change of power supply automatically [9].

Arduino MKR 1010 board can be programmed either using the official Arduino IDE software or directly on Internet platforms providing a programming environment, such as Arduino IoT Cloud. All the mentioned features make this development board the preferred choice for emerging IoT projects [10].

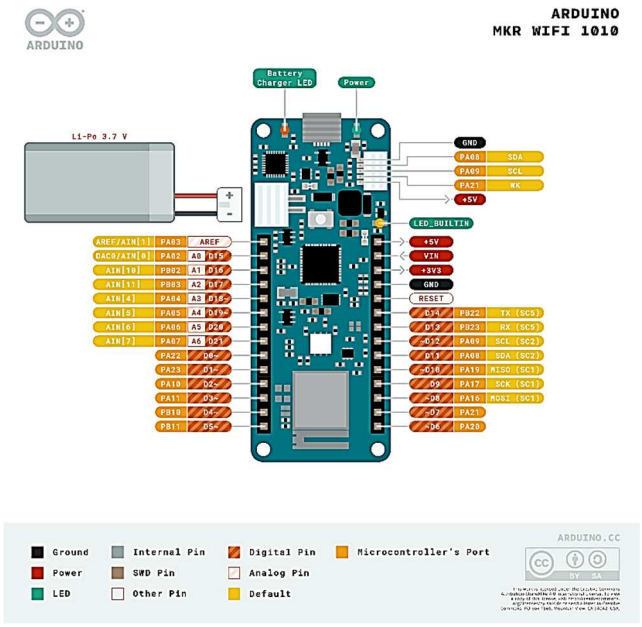


Fig. 7. Arduino MKR 1010 [11]

For more demanding requirements for performance or safety, Arduino also offers the PRO version, which is available under the name Portenta family – Portenta H7 (Fig. 8). However, the MKR 1010 board was also suitable for our purposes and requirements [12].

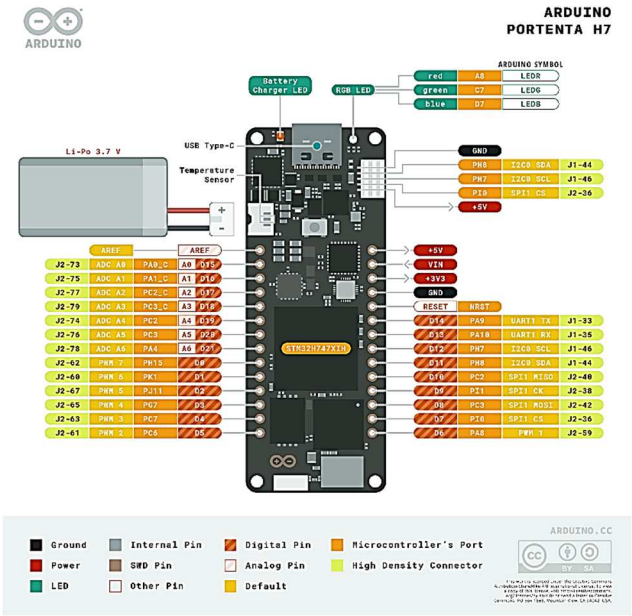


Fig. 8. Arduino Portenta H7 [12]

If it is not possible to use Wi-Fi communication in the practical application of the created system, it is necessary to choose a board containing a GSM module – specifically MKR GSM 1400 (Fig. 9). All inputs and outputs are identical to the Wi-Fi version of MKR 1010, so the resulting solution is easily modifiable in the GSM version [13; 14].

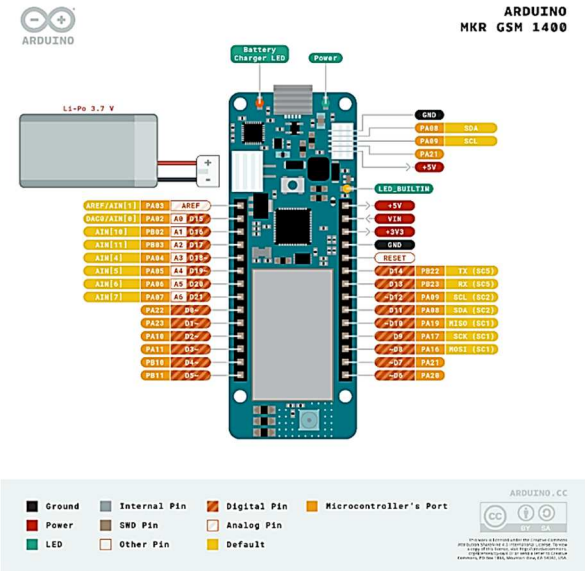


Fig. 9. Arduino MKR GSM 1400 [13]

Measuring chain. Deformations that we want to measure with strain gauges are usually very small. Changes in resistance are also minimal. It is not possible to measure them directly, so it is necessary to use an amplification module [1].

The resulting measuring chain (Fig. 10) consists of a strain gauges (beam on which strain gauges are applied). This module was used to simplify the preparation and testing of the solution. In practical use, strain gauges are applied to the monitored structure (depending on the stress we would like to monitor). Another element used is the HX711 amplifier conversion module. The connection between the strain gauges and the HX711 module is made using an electric "Wheatstone" voltage bridge. The HX711 module is used to amplify and convert the output signal to the Arduino MKR 1010 microcontroller, which displays the acquired data on the LCD display to the user and simultaneously sends the measured data to the cloud.

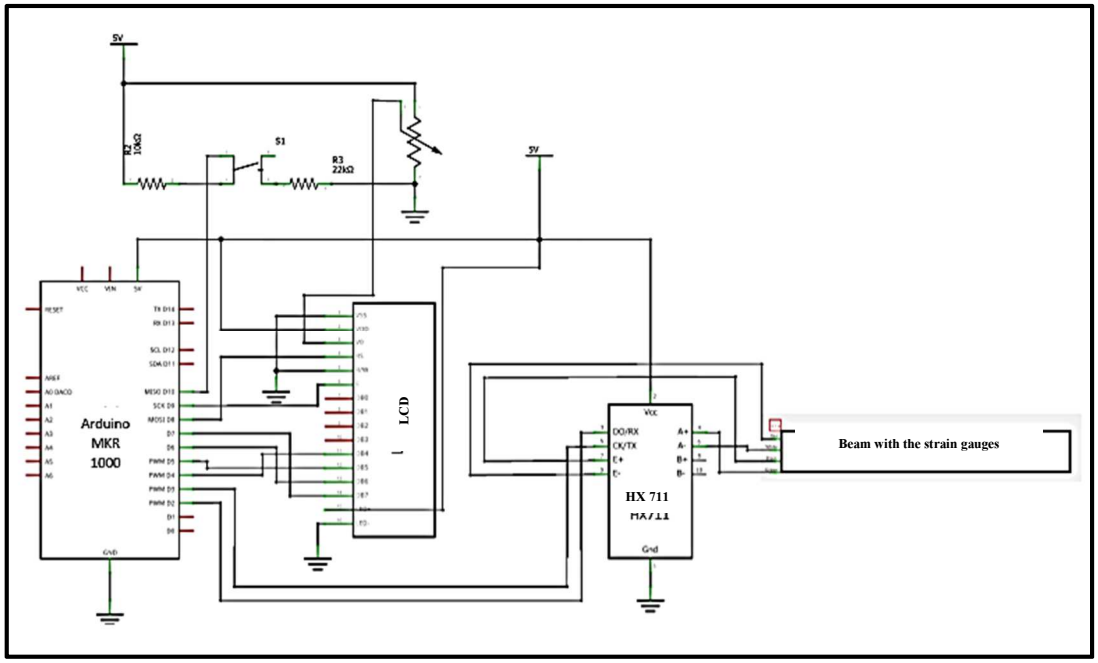


Fig. 10. Final measuring chain [16]

The final form of the monitoring equipment connection design developed in the Fritzing program is shown in (Fig. 11).

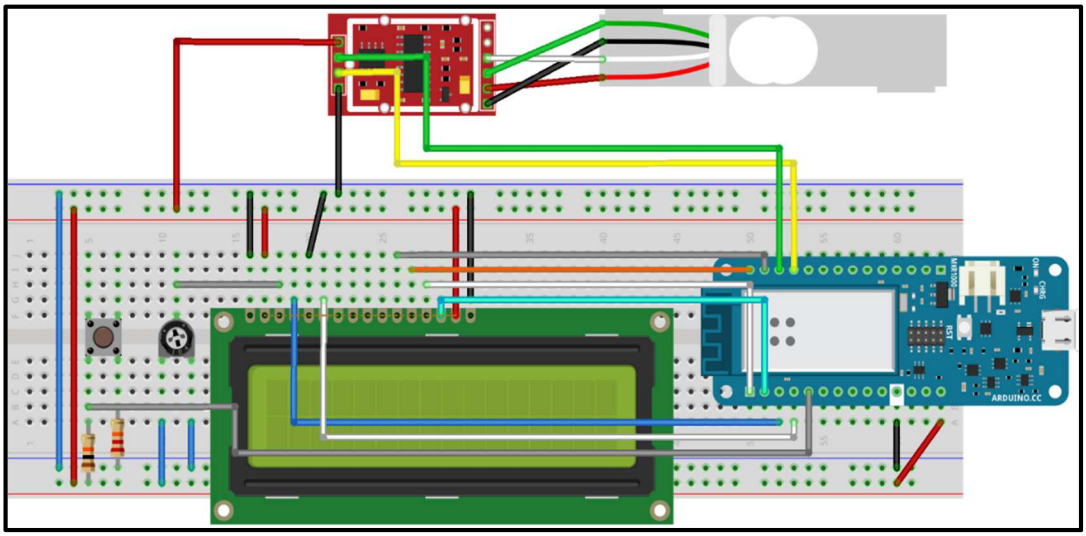


Fig. 11. Equipment connection design from Fritzing [16]

The software part of the solution was implemented on the Arduino IoT Cloud platform (Fig. 12). Arduino IoT Cloud is an Internet platform, containing a number of tools for connecting objects, devices within the Internet of Things and thus the rapid exchange of data in real-time. Ability to watch them from anywhere through a simple user interface [15].

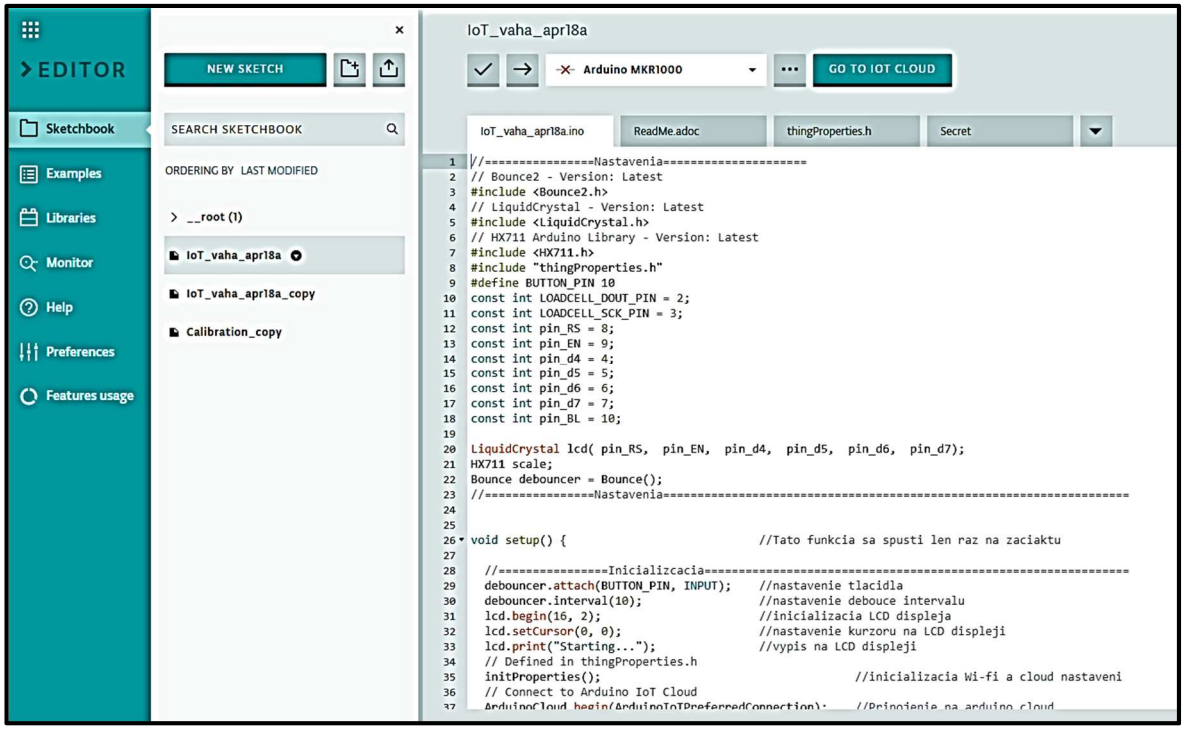


Fig. 12. Sample of final code from Arduino IoT Cloud [16]

After creating the software, the functionality of the device was tested. An example of testing is shown in Fig. 13. Testing verified the functionality of the solution.

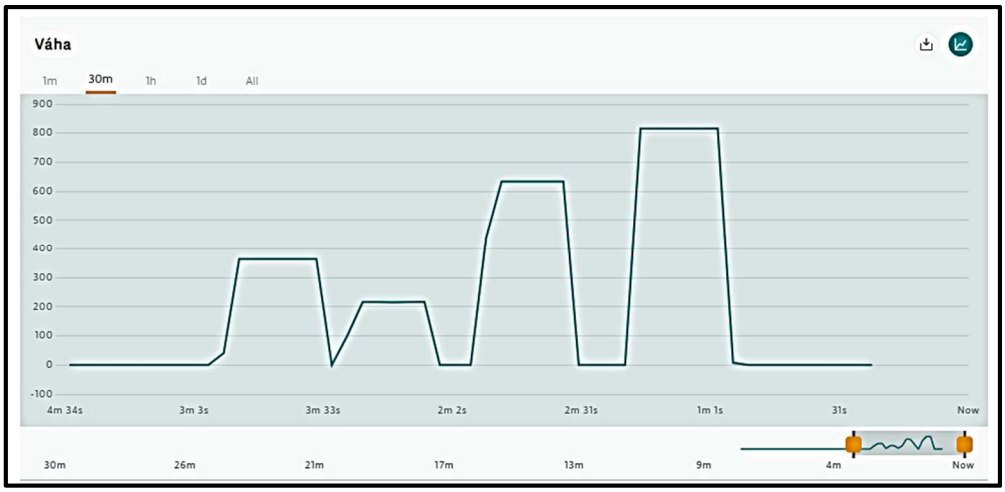


Fig. 13. Sample of testing [16]

Conclusions. This article aimed to present the possibilities of remote stress monitoring in structures using IoT technology. In the first part, we presented the existing commercially available options. These devices represent complex top monitoring possibilities, not only stress measurement - but they are financially demanding. That is why we decided to create a monitoring device, which is not so expensive. The advantage of the created device is also that it is possible to adjust it according to preferences. For example, if a Wi-Fi network is not available, the system can be modified to use the GSM network. It is also possible to modify the power supply - the device can be powered from the mains, or use a battery or solar cell as a source [16].

The created device is still in development, and it is necessary to work on its software page. The plan is to create a mobile application that would also include notification options that would alert the user to the achievement of critical values.

Acknowledgement. This work was supported by grant project VEGA 1/0330/19.

References

1. Trebuňa, F., Šimčák, F.: P. (2011), Metódy experimentálnej analýzy napätosti, TU v Košiciach, ISBN:978-80-553-0766-4 [in Slovak].

2. Serpanos, D., Wolf, M. (2018), Internet-of-Things (IoT) Systems, Springer International Publishing AG, ISBN:9783319697147 [in English].

3. A study of strain and deformation measurement using the Arduino microcontroller and strain gauges devices (2018), SciELO, Retrieved from https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_ arttext&pid=S1806-11172019000300401 [in English].

4.HBM (2020), QuantumX Data Acquisition System, Retrieved from https://www.hbm.com/en/2128/quantumx-compact-universal-data-acquisition-system/ [in English].

5. HBM (2020), PMX Multi Channel Data Acquisition System, Retrieved from https://www.hbm.com/en/2981/pmx-modular-measuring-amplifier-system-for-the-iot/ [in English].

6. Embedded Micro Technology (2020), MyPi, Retrieved from http://www.embeddedpi.com/integrator-board [in English].

7. Industrial Shields (2020), https://www.industrialshields.com/industrial-programmable-logic-controllers-based-on-arduino-raspberry-pi-and-esp32 [in English].

8. Arduino (2020), https://arduino.cc [in English].

9. Arduino MKR 1000 family (2020), Retrieved from https://www.arduino.cc/pro/hardware/product-family/mkr-family?id=1996559, [in English].

10. Javed, A. (2016), Building Arduino Projects for the Internet of Things - Experiments with Real-World Applications, Apress, ISBN-13: 978-1484219393 [in English].

11. Arduino MKR 1010 (2020), https://store.arduino.cc/arduino-mkr-wifi-1010, Retrieved from [in English].

12. Arduino Portenta H7 (2020), Retrieved from https://www.arduino.cc/pro/hardware/product/portenta-h7 [in English].
13. Arduino MKR GSM 1400 (2020), Retrieved from https://store.arduino.cc/arduino-mkr-gsm-1400-1415 [in English].
14. Rákay, R., Galajdová, A. (2019), Comparison of communication protocols for smart devices, Technical Sciences and Technologies, Chernihiv National University of Technology, v. 17, n. 3, p. 146-154, ISSN 2411-5363 [in English].
15. Arduino IoT Cloud (2020), Retrieved from https://www.arduino.cc/en/IoT/HomePage [in English].
16. Studený, M. (2020), Monitoring napätí v konštrukcii pomocou IoT, Košice [in Slovak].

УДК 620.17

Патрик Шарга, Мартін Студений

МОЖЛИВОСТІ ВИМІРЮВАННЯ НАПРУЖЕНЬ У КОНСТРУКЦІЯХ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Актуальність дослідження. *У багатьох галузях промисловості важливим є визначення внутрішніх напружень різноманітних конструкцій. Ці данні необхідні для аналізу безпеки використання, постійного контролю за станом, планування технічного обслуговування, загального прогнозування терміну служби конструкцій, а також для інших цілей, спрямованих на економію фінансів та часу, що необхідні для ремонту.*

Постановка проблеми. *Метою дослідження є створення недорогого моніторингового пристрою за принципом IoT для контролю напружень у конструкції.*

Аналіз останніх досліджень і публікацій. *При розробці системи та підготовці даної статті враховані як поточні джерела – публікації та статті, що стосуються сучасного стану розвитку моніторингових систем IoT, так і існуючі рішення, які доступні на ринку.*

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. *На цьому етапі розглядається можливість створення мобільного додатку для визначення внутрішніх напружень у конструкціях. Його впровадження планується на наступному етапі розробки.*

Мета дослідження. *Метою статті є пояснення принципу створення системи моніторингу IoT за допомогою платформи Arduino.*

Виклад основного матеріалу. *У роботі використані компоненти торгової марки Arduino, яка є провідною апаратно-програмною екосистемою з відкритим кодом. Компанія пропонує широкий спектр програмних засобів, апаратних платформ та документації, що дозволяє майже будь-кому проявити творчий підхід до роботи з технологіями.*

Висновки відповідно до статті. *Створено пристрій моніторингу IoT на платформі Arduino. Програмна частина реалізована у середовищі Arduino IoT Cloud. Тестування пристрою підтвердило його функціональність під час практичного використання створеної системи. Передбачена можливість зміни пристрою для забезпечення його кращої відповідності зазначеним вимогам.*

Ключові слова: *Arduino; одноплатний комп'ютер (RPi) Інтернет речей (IoT); тензодатчики; Arduino IoT Cloud. Рис.: 13. Бібл.: 16.*

Patrik Šarga – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Automation and Human Machine Interactions, Faculty of Mechanical Engineering, Technical University of Košice (9 Letna Str., 041 00 Kosice, Slovakia).
E-mail: patrik.sarga@tuke.sk
ScopusAuthor ID: 15128102900

Martin Studený– student of mechanical engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Technical University of Košice (9 Letna Str., 041 00 Kosice, Slovakia).
E-mail: martin.studeny@student.tuke.sk

Šarga, P., Studený, M. (2020). Possibilities of stress measurement in structures using modern technologies. *Technical sciences and technologies*, *3*(21), pp. 249-258.

UDC 004.4
DOI: 10.25140/2411-5363-2020-3(21)-259-265

Tatiana Kelemenová, Ivana Koláriková, Ondrej Benedik

IDENTIFICATION OF CONDITION OF LINEAR DISPLACEMENT SENSOR

Urgency of the research. *There are several types of displacement sensor available on market. Displacement sensor investigated in this work is based on optical encoder principle. Condition of sensors changes with using of it. Periodically it is necessary to check its condition, if it is within the declared limits.*

Target setting. *Displacement linear sensor is mounted in comparator stand for the verifying of its condition using the set of length gauge blocks. Length gauge blocks allows to set up the etalon of length with various dimension in interval from 0.5mm to 100 mm. The systematic errors of used set of length gauge blocks of grade "0" are very small in comparing with measured dimension and measured deviations.*

Actual scientific researches and issues analysis. *It is necessary to check actual status of sensor. It means that verification process will obtain the information about maximum permissible error and information about reliability.*

Uninvestigated parts of general matters defining. *The main problem was to identify condition of sensor. The question of the probability distribution of measured values and uncertainty balance are uninvestigated, because the next research will be focused to this are.*

The research objective. *The aim is to obtain maximum permissible error of explored sensor. On the base of deviation of measurement made on length gauges could be expressed. The optimal number of measurement is problem to know, because the low number will cause big uncertainty of measurement and large number of measurement will cause the large cost of measurement.*

The statement of basic materials. *Gauge length blocks have been used for verification of investigated sensor. The set of gauge length blocks of grade "0" has been used, which are preferred mainly for calibration or verification purposes. Maximum permissible error has been estimated as math model for next using. Also optimal number of measurement is identified from analysis of standard deviation of measurements made one hundred times on selected dimensions.*

Conclusions. *The investigated sensor meets the maximum permissible error limits set by the manufacturer with a large margin, and so the maximum permissible error limits have been tightened so that the measurement uncertainty is better. The sensor can be used in dimensional measurement applications, even in industrial conditions.*

Keywords: *Displacement sensor; distance; measurement; maximum permissible error; length gauges.*
Fig.: 20. References: 4.

Introduction. This work is focused on the field of engineering metrology of lengths. The main problem in practice is the measurement of lengths with a sufficiently fast reaction time and minimal measurement uncertainty. These are mainly measurements of the dimensions of components in industrial production. For this purpose, different types of gauges are produced based on different physical principles. Measuring systems for measuring dimensions can be divided according to the output quantity into mechanical and electrical gauge. In the case of mechanical gauge, the measured dimension is transformed into a mechanical change in the position of the indicator. For electrical gauge, the measured dimension is transformed into an electrical signal displayed on electrical instruments and display units.

Mechanical gauges are often used, but their accuracy is limited by the inaccuracy of mechanical components and various parasitic phenomena such as friction, backlash and hysteresis. Their service life is limited due to their gradual wear and require maintenance. The measurement uncertainty with these types of meters is unstable over time and tends to deteriorate over time, precisely due to mechanical parasitic phenomena.

For these reasons, it is therefore an attempt to replace mechanical gauge with electrical gauge, where some physical principle is used to transform the measured dimension into an electrical quantity (e.g. electrical voltage, electric current, frequency, pulse width or digital coded signal).

Electric dimensional gauge most often use the resistance principle, optical principle, capacitive principle, ultrasonic principle, inductance principle, Hall Effect, etc. Each of these principles has its advantages and limitations, according to which it is necessary to choose a suitable principle for the application [1].

In this article, the condition of the Linear displacement sensor (fig.1), which uses a photoelectric linear encoder consisting of a transmitter - LED diode and a receiver - photodiode, will be investigated experimentally. By moving the measuring ruler with permeable and impermeable places with a spacing of 20 micrometers, with which it is possible to determine the position of the ruler and thus the measured object. The output of the sensor is a rectangular course of

© Тетяна Келеменова, Івана Коларікова, Андрій Бенедік, 2020

electrical voltage. The sensor can be used in any position. The measuring range of the sensor is 100 mm with a resolution of 0.1μm. The maximum inaccuracy of the sensor is declared at the level (2 + L / 100) μm, where L - is the measured length in millimeters. The sensor is enclosed in a housing with dust and water resistance at the level IP54 of degree of protection. This allows this sensor to be used in industrial operation as well. Spindle is droved with helical spring and contact point is standard 3 mm ball contact point, which is changeable with another contact point. The sensor is connected to digital counter with LED display with possibilities to execute several math functions (fig. 2).



Fig. 1. Verified displacement sensor



Fig. 2. Displacement sensor in comparator stand with digital counter

1. Experimental verification of the sensor. Experimental verification of sensor has been executed via using the length gauge blocks of grade "0" (fig. 3). Verification process has been done using the comparator stand and set of length gauge blocks [2, 3, 4]. The sensor is fixed in comparator stand and length gauge blocks as etalon were placed between the comparator table and spindle contact point (fig. 4). Three pieces of the sensor have been available. The aim is to select the best of them and verify it for achievable accuracy of measurement.



Fig. 3. Set of length gauge blocks (grade 0)



Fig. 4. Verification process of sensor

All three sensors are verified using the set of length gauges as etalon. In the range from 0 to 100 mm, a standard was set from a set of length gauge blocks to verify all sensors. Systematic errors of used length gauge blocks are evaluated as algebraic sum of systematic errors of used individual length gauges (fig. 5). Each millimetre was measured 3 times and the mean values of these measurements are shown in fig. 6. As it is visible, the systematic errors of the scales are much smaller than the values measured by the sensor, so these errors can be neglected and it is not necessary to correct the measured values with these systematic errors of the scales.

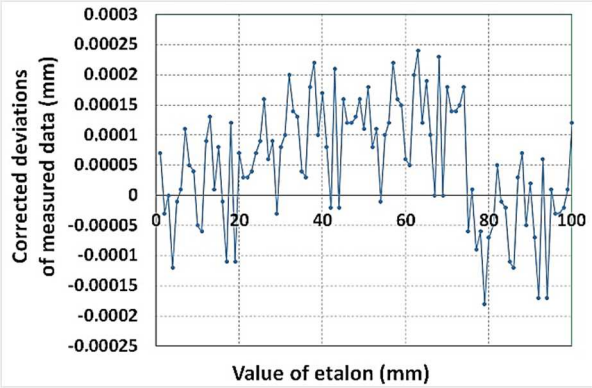


Fig. 5. Systematic errors of length gauge blocks – etalons for every verified dimension

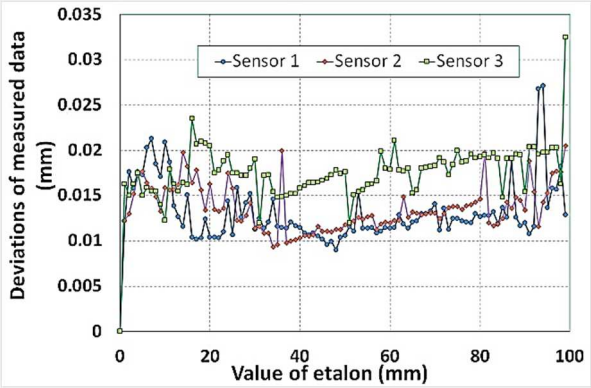


Fig. 6. Deviations of measured data from three available sensors

From fig. 6 it is visible, that the sensor 2 is the best in terms of the measurement accuracy achieved. Therefore, the condition of this sensor will be further investigated. If this sensor is in good condition, it will be used for digital measurement in a length measuring machine for the purpose of modernizing this machine.

Fig. 7 shows the course of deviations of the measured data from the values of the standards. All values are shifted to positive values and the course shows that it could be a systematic error of some part of the measuring chain. The average value of the deviations could be used to correct the measured values to improve the accuracy of the measurement. However, even after this correction, several values would show a relatively large measurement error (fig. 7). The values of deviations show a slightly fluctuating tendency, so it is possible to try to approximate their polynomial function, but if it were used to correct the measured values in this case, some values would show a large measurement error (fig. 8).

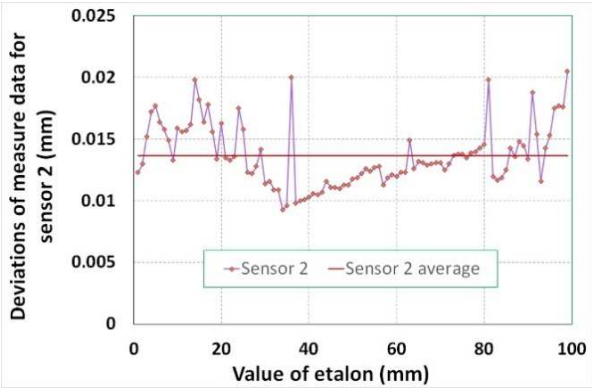


Fig. 7. Deviations of measured data from sensor 2 with approximation with average

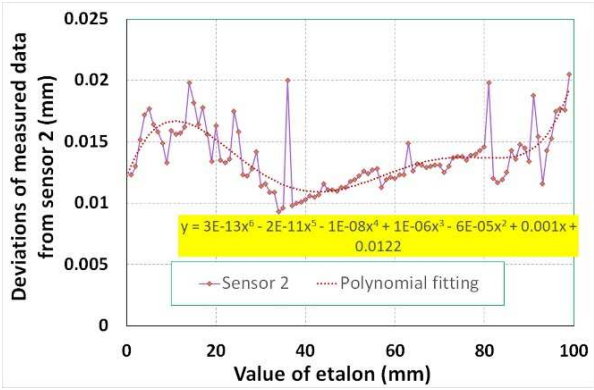


Fig. 8. Deviations of measured data from sensor 2 with approximation with polynomial function

Fig. 9 shows the correction by means of the average value of deviations, and for comparison, a correction was also performed by means of half the value of the variation range (Fig. 10), and in this case the situation is more favourable in terms of measurement errors.

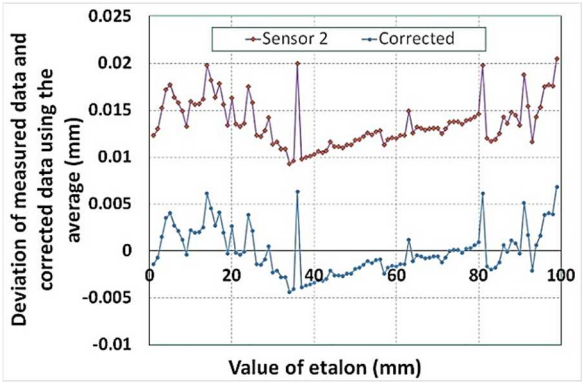


Fig. 9. Deviations of measured data from sensor 2 and deviations corrected using the average value

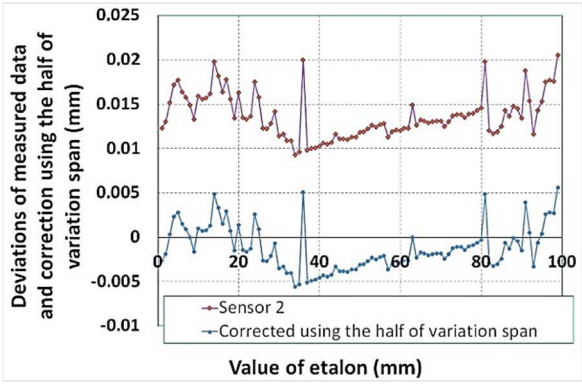


Fig. 10. Deviations of measured data from sensor 2 and deviations corrected using the half of variation span

Next, a correction using half the variation range of the measurement deviations will be considered (Fig. 11). It is then possible to set the maximum deviation limits to ±6 μm. These thresholds could further be used to estimate the measurement uncertainty of the measurement chain, usable for balancing measurement uncertainties that are not known. Based on the experience of measuring with this sensing system, this is the uncertainty determined by method B (fig. 11).

ISO 10360 standard stated as a limit value of the so-called maximum permissible error - *MPE*. It is given in the form of a linear mathematical model $MPE = A + L / B$, which can be more easily processed in the case of use in the processing of measured values. The sensor manufacturer states the maximum permissible error value for this examined sensor in the form $MPE = + - (2 + L / 100)$ in micrometers, where L is the measured value in millimeters.

By plotting this value in the graph of measurement deviations, it is possible to determine whether this sensor complies with the maximum permissible error defined by the manufacturer (fig. 12). The graph (fig. 12) shows that the values are within the defined area bounded by the maximum permissible error values, which means that the sensor complies with the maximum permissible error values specified by the manufacturer.

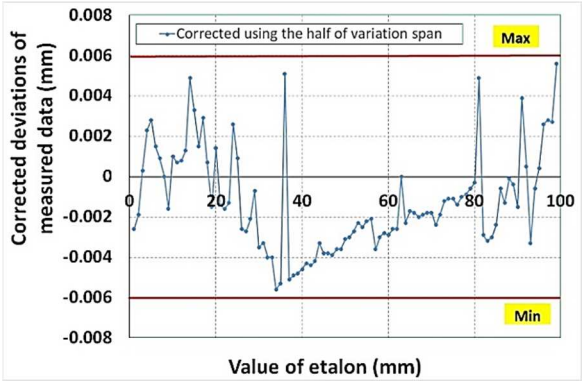


Fig. 11. Deviations corrected using the half of variation span with limits

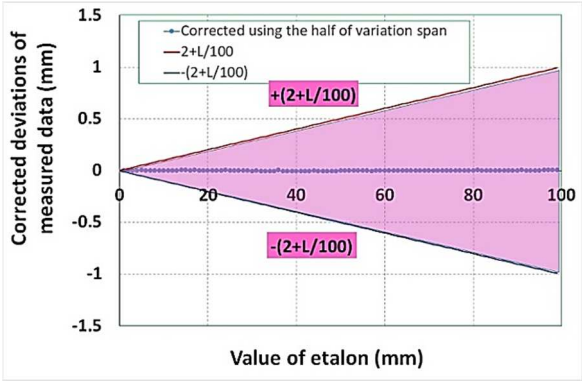


Fig. 12. Comparison of measurement deviations with limits defined by producer

Fig. 12 shows that the sensor with a large margin meets this criterion set by the manufacturer. In Fig. 12, however, it is not possible to see whether the range of values near the zero value meets this criterion due to the display scale. This can be assessed in detail (fig. 13), which shows the situation in the interval near the zero value. This graph (fig. 13) also confirmed that the sensor is in excellent condition.

Since the sensor with a large margin meets the maximum permissible error set by the manufacturer, then the current new maximum permissible error limits can be determined to characterize the current condition (fig. 14). The new maximum permissible error can therefore be approximated by the mathematical model ±(2 + *L* / 400) (fig. 14). This border area (fig. 14). It is possible to use later it for a more accurate assessment of the current measurement condition of this measurement system.

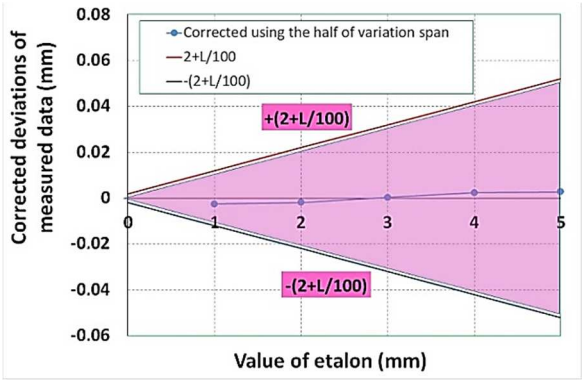


Fig. 13. Comparison of measurement deviations with limits defined by producer – detail near the zero

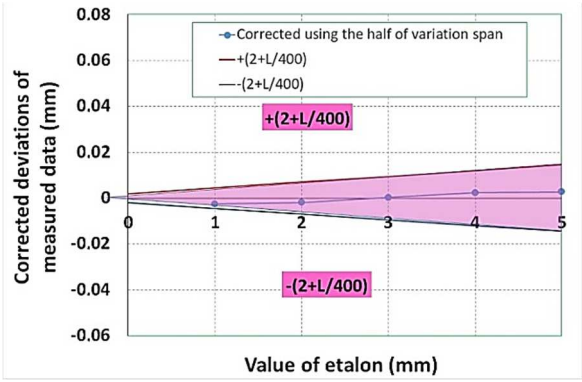


Fig. 14. Comparison of measurement deviations with reduced limits – detail near the zero

2. Repeatability. Another important evaluation criterion of the measuring system is the repeatability of the measurement. Measurement repeatability expresses the ability of the measurement process on the measuring system to show approximately the same value of the measured quantity under the same measurement conditions. If the measured values are very scattered during repeated measurements, it means that the measurement process is unstable and the repeatability of the measurement is unsatisfactory. Five dimensions (0 mm; 5 mm; 25 mm; 50 mm; 70 mm) were selected for the repeatability assessment, in which 100 measurements were performed under the same conditions (Fig. 15, Fig. 16, Fig. 17, Fig. 18, Fig. 19). For a qualitative assessment, fig. 20 shows the cumulative standard deviations. This means that out of a series of 100 measured measurements, the reference values are gradually evaluated with increasing measured values. Therefore, they are called cumulative standard deviations.

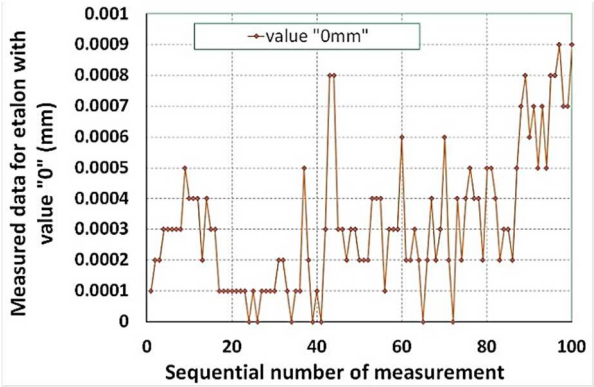


Fig. 15. Measured values for etalon with value "0 mm"

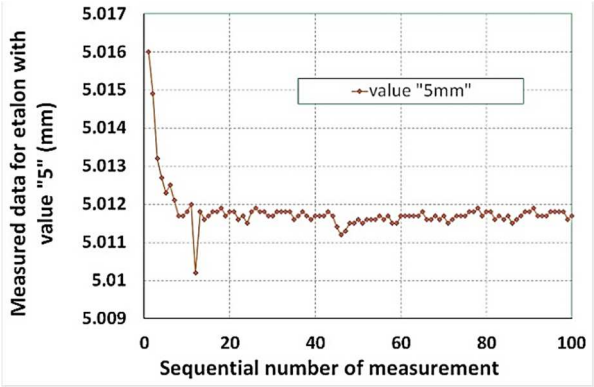


Fig. 16. Measured values for etalon with value "5 mm"

Cumulative standard deviations provide information on how many measurements the measurement process stabilizes. The standard deviation is also used to determine the standard uncertainty by method A. As can be seen from fig. 20, after exceeding the number of measurements 40, there is no further significant reduction in the value of the standard deviation and thus no reduction in the standard uncertainty determined by method A. It is therefore unnecessary to measure more than 40 times, since the measurement process is already stabilized.

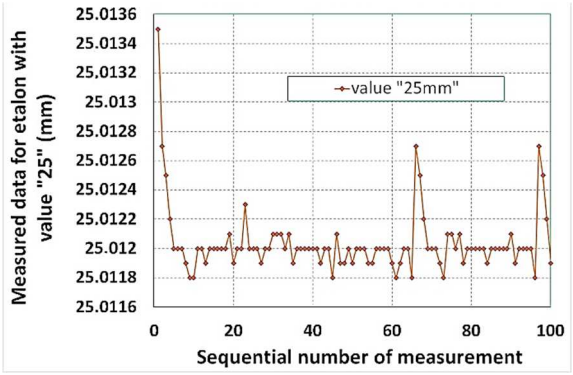


Fig. 17. Measured values for etalon with value "25 mm"

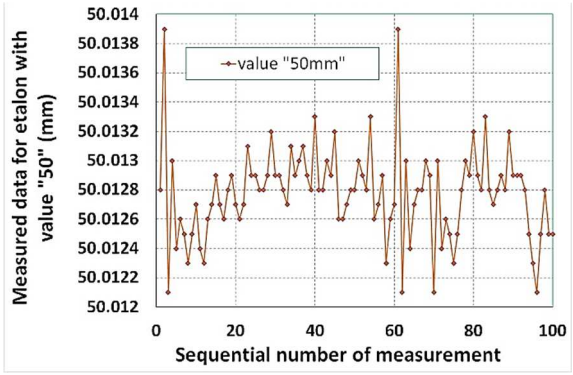


Fig. 18. Measured values for etalon with value "50 mm"

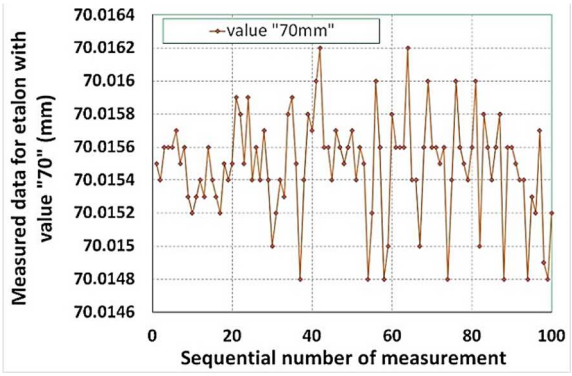


Fig. 19. Measured values for etalon with value "70 mm"

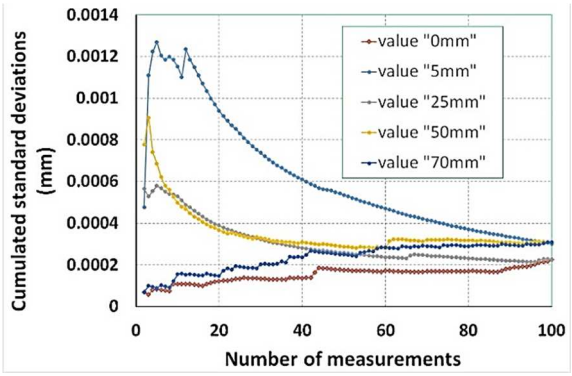


Fig. 20. Cumulative standard deviations for one hundred measurements for selected dimensions

Based on fig. 20, it is thus possible to determine what uncertainty can be obtained by the method A with a specific number of measurements. The question of the required number of measurement repetitions can therefore be determined in this way.

Conclusion. The displacement is one of the most frequently measured quantities in the industry. The sensor investigated in this work is made for use in industrial conditions. After using this sensor, it is necessary to check its condition after a certain time, whether it meets the specified conditions. Using a set of length gauge blocks, measurement inaccuracies were detected, which, however, were within the range delimited by the maximum permissible error values. It is even possible to narrow these limits in order to show a better value of maximum inaccuracy and hence the value of standard uncertainty by method B. Examination of measurement repeatability answered the question of what is the optimal number of measurements to achieve a specific standard deviation that can be considered standard uncertainty determined by method A. Further research will focus on determining the mathematical statistical model of the distribution of measured values, which is needed to determine the coefficient of expansion to determine the expanded measurement uncertainty for the investigated sensor.

Acknowledgement. *The work has been accomplished under the research project APVV-15-0149, VEGA 1/0224/18, KEGA 006STU-4/2018 financed by the Slovak Ministry of Education. This paper was published in cooperation with company KYBERNETES s.r.o. within the project "Research and development of the ECOGI product at KYBERNETES", ITMS Code of Project: 313012Q955.*

References

1. CHUDÝ, V., PALENČÁR, R., KUREKOVÁ, E., HALAJ, M. (1999). Measurement of technical quantities (in Slovak). Edition of STU, 1st. ed., 1999. ISBN 80-227-1275-2.

2. EA-4/02 M:2013 Evaluation of the Uncertainty of Measurement In Calibration. Publication Reference. European Accreditation Laboratory Committee. September 2013 rev 01. cited August, 8th, 2019. Available online: https://european-accreditation.org/wp-content/uploads/2018/10/ea-4-02-m-rev01-september-2013.pdf. EA-4/02 is a mandatory document belongs to Category: Application documents and Technical Advisory documents for Conformity Assessment Bodies.

3. ISO 3650:1998(E) International Standard, "Length standards – Gauge Blocks," International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

4. JCGM 100 – Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement (ISO/IEC Guide 98-3). First edition September 2008. Available online: http://www.iso.org/sites/JCGM/GUM-JCGM100.htm.

UDC 004.4

Тетяна Келеменова, Івана Коларікова, Андрій Бенедік

ІДЕНТИФІКАЦІЯ СТАНУ ДАТЧИКА ЛІНІЙНОГО ЗМІЩЕННЯ

Актуальність теми дослідження. *На ринку доступно кілька типів датчиків переміщення. Датчик переміщення, досліджений у цій роботі, базується на принципі оптичного кодера. Стан датчиків змінюється при його використанні. Періодично необхідно перевіряти чи він знаходиться в заявлених межах.*

Постановка проблеми. *Вимірювальний лінійний датчик встановлений у стенді компаратора для перевірки його стану за допомогою набору вимірювальних блоків довжини. Блоки для вимірювання довжини дозволяють встановити еталон довжини з різними розмірами в інтервалі від 0,5 до 100 мм. Систематичні похибки використовуваного набору блоків калібрувальної довжини класу «0» дуже малі в порівнянні з виміряними розмірами та виміряними відхиленнями.*

Аналіз останніх досліджень і публікацій. *Необхідно перевірити фактичний стан датчика. Це означає, що в процесі перевірки буде отримана інформація про максимально допустиму похибку та інформація про його надійність.*

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. *Основною проблемою було виявлення стану датчика. Питання розподілу ймовірностей виміряних значень та балансу невизначеності не досліджені, тому наступне дослідження буде зосереджене саме на цьому.*

Постановка завдання. *Мета полягає в тому, щоб отримати гранично допустиму похибку, яку можна виміряти, досліджуваним датчиком на основі відхилення вимірювання, виконаного під час вимірювання довжини. Визначити оптимальну кількість вимірювань складно, тому що мала кількість викличне велику неточність вимірювання, а велика кількість вимірювань призведе до високих витрат на вимірювання.*

Виклад основного матеріалу. *Для перевірки досліджуваного датчика використовувалися блоки вимірювальної довжини. Був використаний набір блоків вимірювальної довжини класу «0», які використовуються в основному для цілей калібрування чи перевірки. Максимально допустима похибка розрахована як математична модель для наступного використання. Також оптимальна кількість вимірювань визначається з аналізу стандартного відхилення 100-кратного вимірювання обраних розмірів.*

Висновки відповідно до статті. *Досліджуваний датчик відповідає гранично допустимим похибкам, встановленим виробником, з великим запасом, і тому гранично допустимі показники похибки були відібрані жорсткіше, щоб похибка вимірювання була точнішою. Датчик можна використовувати для вимірювання розмірів, навіть у промислових умовах.*

Ключові слова: *датчик переміщення; відстань; вимірювання; гранично допустима похибка; датчики довжини.*
Рис.: 20. Бібл.: 4.

Kelemenová Tatiana – doc. Ing., PhD, Faculty of Mechanical Engineering, Technical University of Kosice (Letna 9, 04200 Kosice, Slovakia).
E-mail: tatiana.kelemenova@tuke.sk
ResearcherID: AAH-7309-2019
Scopus Author ID: 55260126300
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9201-7517

Ivana Kolárikova – Ing., PhD student, Faculty of Mechanical Engineering, Technical University of Kosice (Letna 9, 04200 Kosice, Slovakia).
E-mail: ivana.kolarikova@tuke.sk

Ondrej Benedik – Ing., PhD student, Faculty of Mechanical Engineering, Technical University of Kosice (Letna 9, 04200 Kosice, Slovakia). Also affiliated with KYBERNETES s.r.o.
E-mail: ondrej.benedik@kybernetes.sk

Kelemenová, T., Koláriková, I., Benedik, O. (2020). Identification of condition of linear displacement sensor. *Technical sciences and technologies*, *3*(21), pp. 259-265.

UDC 681.5
DOI: 10.25140/2411-5363-2020-3(21)-266-273

Róbert Rákay, Alena Galajdová

TESTING PROPERTIES OF SMART CONDITON MONITORING SYSTEM

Urgency of the research. *Modern trends in the automation focus on the implementation of new technologies to reduce production and maintenance costs. Maintenance and service of every industrial automation system is crucial.*

Target setting. *When engineers try to optimize the cost of production and processes, they usually reduce maintenance cost. The latest smart monitoring systems provide significant benefits in terms of risk management and equipment failure reduction.*

Actual scientific researches and issues analysis. *To prepare this paper, various publicly available datasheets and experimental solutions were analyzed as well as conclusions of other experiments were used to create the knowledge base on this research topic.*

Uninvestigated parts of general matters defining. *Many different monitoring technologies can operate online and offline from various vendors of automation technologies. This paper is insufficient to describe them all.*

The research objective. *In this article, automation monitoring systems were analyzed in terms of problems with machine inspection and predictive maintenance. And the results of the article form the basis for a further research task.*

The statement of basic materials. *To predict a future malfunction or to prevent the failure of an industrial machine now it is necessary to implement the latest monitoring technologies. The use of compact solutions in smart monitoring, such as Mitsubishi SCM or VIKON MMP, provides a good basis for solving problems such as bearing breakdowns and its subsequent failure.*

Conclusions. *The proposed paper provides possibilities for smart monitoring of an industrial automation system. The tested system can provide useful information about unknown conditions inside our device, without interrupting the operation.*

Keywords: *monitoring; maintenance; automation.*
Fig.: 9. Table: 1. References: 9.

Introduction. The main goal of monitoring is to minimize the risk of failure by understanding the conditions by early fault detection. Failures can happen, but can be avoided. When a fault is triggered, the device loses power and a general degradation begins. With longer lasting defects the costs of intervention and consequences will increase with the risk of total device functional failure (Fig.1).

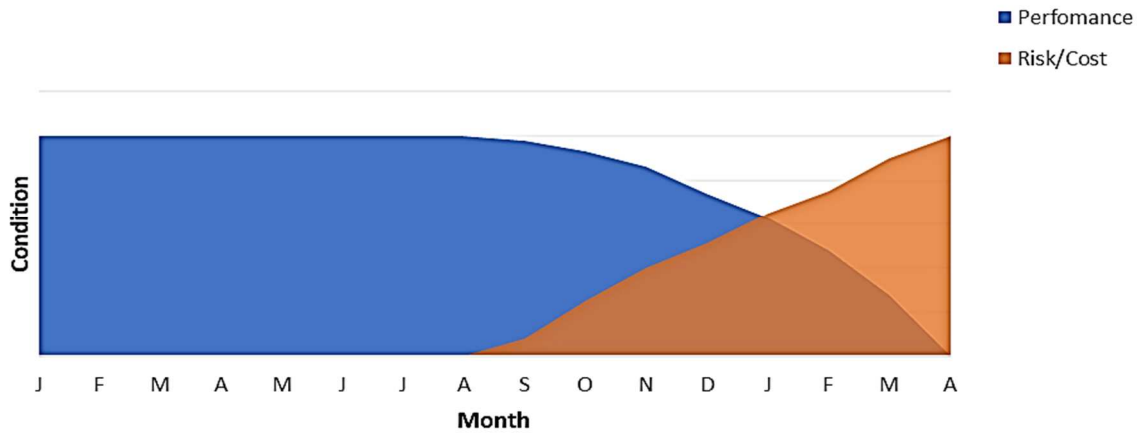


Fig. 1. Performance and Risk/Cost trends based on undetected defect occurrence

Together with real-time monitoring we can scan every part of a working device such as electric motor, rotor, stator, pump, pump rotors, bearing, gearbox etc. We use vibration to see inside the machine, to understand which component is degrading. Temperature measurement and ultrasound analysis are also standard methods for condition monitoring [1].

To increase the reliability of the performing device we must go beyond standard maintenance methods. These methods include elimination of unreliable suppliers, cheap spare parts, improper transportation, unskilled users, poor large scale design. In practice, inseparable steps in the maintenance of property are small-scale lubrication technology, high-quality spare parts and proper installation and operating procedures [2, 3].

The main function of the central processing unit in automated production systems include:

- Acquisition of production data (product type, number, time data).
- Activation of required component programs.

© Роберт Ракай, Альона Галайдова, 2020

- System for exchange of information.
- Data exchange in the transport system.
- Data exchange in the measuring system.
- Representation of information for the user Continuous condition monitoring and diagnostics.

These functions are valid for modern devices and devices but, in the industrial area there are a large number of older machines that work continuously to this day. These devices also need to be monitored and diagnosed without interrupting their operation.

The main reasons for monitoring and diagnostics:

- Production systems and machine contain high value devices and parts, where there is a small defect or the error can cause large loss of production and damage on the machine.
- At high machine performance, the condition of the product, machine, or apparatus may change. A system with high level of automation produces a large amount of diagnostic data that cannot be monitored by human user alone.

Condition monitoring. The main goal of the monitoring system is to monitor the production machines and the system, to prevent damage to the machine tool and workpiece and to ensure the continuous operation. Monitoring can be devided to measurement, processing, decision and intervention. As main aspects of real-time condition monitoring, we must to ensure that this does not affect the speed of the system, and the system has to intervene before the actual damage has occurred. A monitoring system can be focused on a product (and its quality), device (or machine), tool or process (Fig.2).

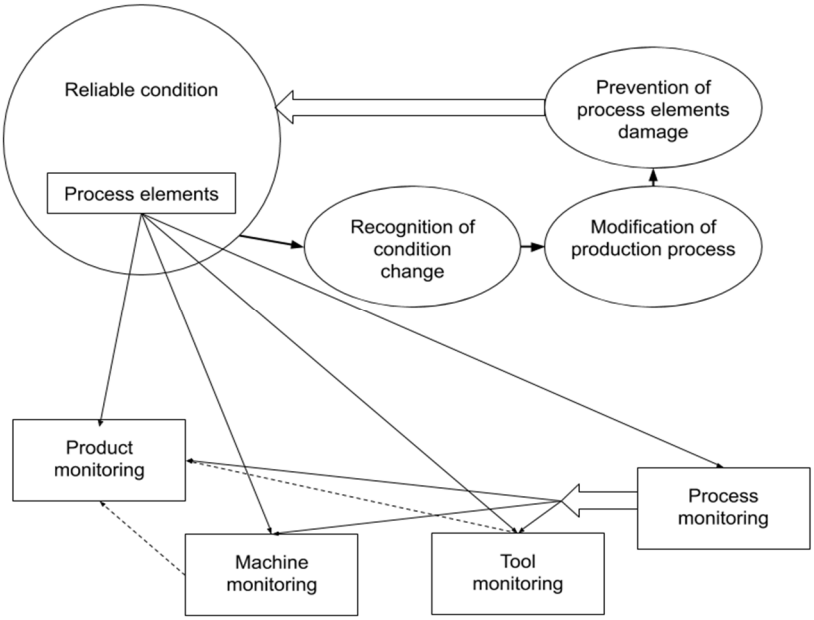


Fig. 2. Relation between monitoring systems

The monitored conditions can be divided into normal, specific, critical and dangerous conditions. The target is to keep the normal state. The particular status fulfils the technological requirements, but the harmful trend is measurable. The critical status is substantially different from normal, the process must be stopped and repaired. In the dangerous state is drastically different, immediate intervention is needed. Parameters are usually digital and analogue data, load, vibration and geometry data [3].

There are different monitoring technics for online and offline inspections. Load monitoring can be performed by force, torque, acoustic emission measurement, where the measured data are compared with the limit values for normal state values.

Vibration monitoring. The vibration follows accessible parts of machines. The measurement can be analyzed in time or frequency domain.

Time domain analysis is less time consuming, graphically describes the conditions and does not provide comprehensive information about the system. Processing may include peak to peak or peak level measurements. For example, the analysis between the peak is useful at maximum stress, the average value determines the time course of the oscillating motion, the effective value (RMS - square root) is the most important part of the amplitude analysis. [5,6]

Frequency domain analysis. In real systems, the vibration signal is very complex. At the same time, there are different signals with different frequencies. The Fourier transform is used to separate the signal. Different parts of a device produce different vibration signal (Fig.3).

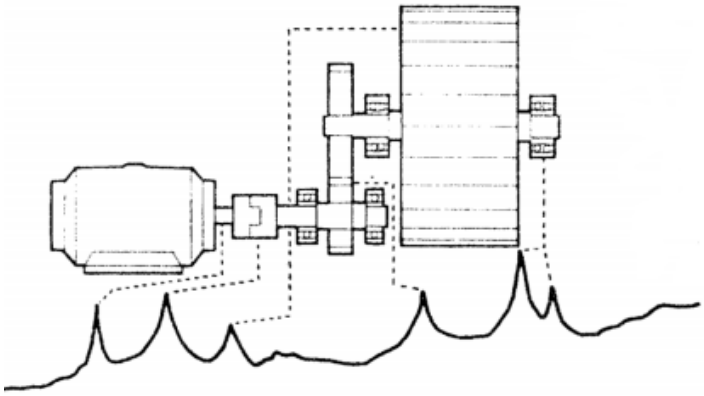


Fig. 3. Vibration signals of different machine parts

Because condition-based maintenance is often used only on the most critical equipments and systems, various vendors developed solutions that allow condition monitoring even in applications where it was not previously available. [4]

Vendors of automation technologies combine and use different technologies. Some technologies and solutions are listed below:

- Temperature measurement with or without direct contact,
- Revolution meters,
- Stray current detector,
- Endoscopes, stethoscopes,
- Noise level meters and ultrasound detectors,
- Vibration detectors etc. (Fig. 4).



Fig. 4. Example condition measurement technologies

These technologies are based on portable devices and the experience of maintenance users. These measurements are usually performed according to plan or when the device detect a fault.

The new level of condition monitoring is based on continuous devices monitoring. An example of such system is VIKON MMP, or MIVA Machine Protector. (Fig. 5) It combines a vibration alarm system with data collection unit. The device can work as separate unit or with connected PC and SW PEMAC for further evaluation and signal analysis [7].

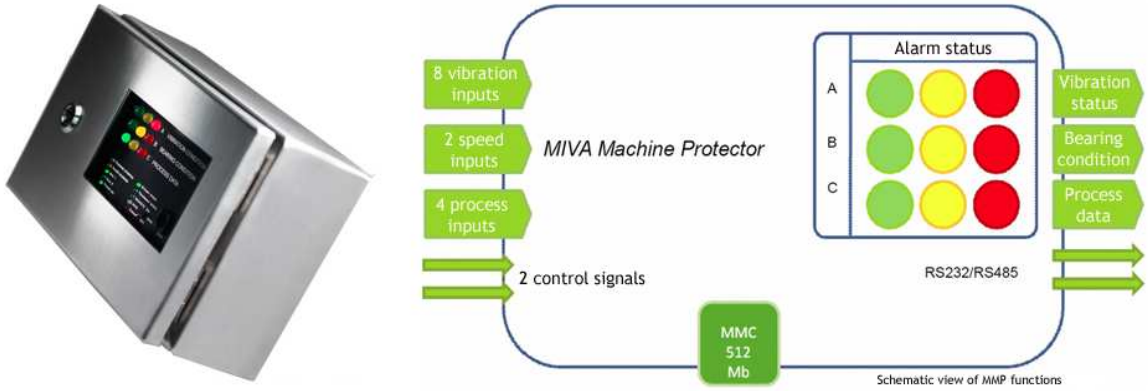


Fig. 5. VIKON monitoring system

Another example of the condition monitoring systems is Mitsubishi Smart Condition Monitoring or SCM KIT. (Fig. 6) It integrates the advanced FAG SmartCheck sensor with a powerful Mitsubishi PLC and HMI [8].

The system consists of: 1-PC station for commissioning, configuration and monitoring, 2 – Ethernet switch for interfacing the devices, 3 – SmartCheck sensor applied onsite, 4 – HMI panel as visualization and control panel, 5 – Programable logic controller for signal processing and automatic response.

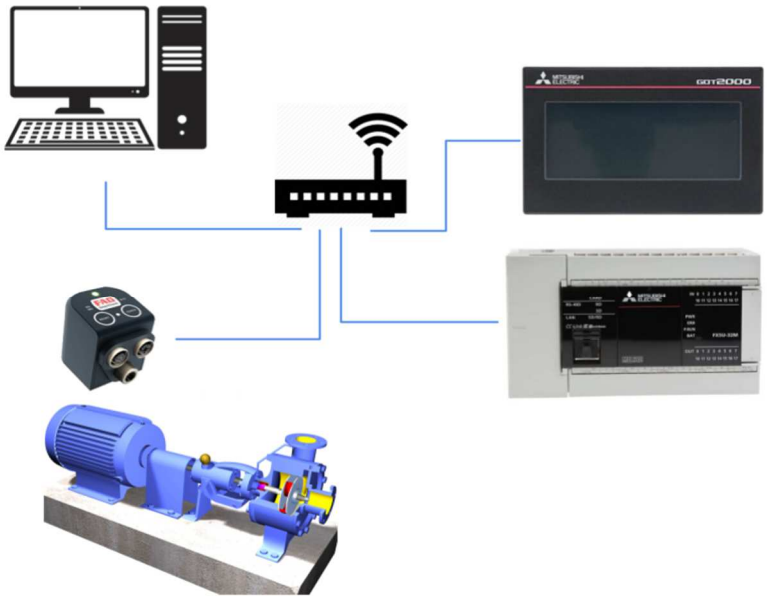


Fig. 6. Network of FAG SmartCheck and Mitsubishi devices [8]

The system includes templates to detect the following damages: rolling bearing damage, unbalance, misalignment, impacts. Monitoring can be carried out in three stages, based on the level of integration to the existing infrastructure. The first stage is a stand alone device, the second stage integrates the SmartCheck to the existing control system, while the third stage outsources external sensor security to the service provider [8].

The main technical data of the SmartCheck are described in the table below [9].

Table

Technical details of SmartCheck device [9]

Vibration	Acceleration sensor (piezoelectric sensor) Frequency range: 0.8 Hz–10 kHz Measurement range: ±50 g
Temperature	Measurement range: -20 to +70°C
Measurement functions	Acceleration Speed and path by integration System temperature Process parameters (e.g. speed, load, pressure)
Diagnostic methods	Time signal, demodulation, spectrum and trend analysis, speed and frequency tracking
Calculated characteristic values	RMS, frequency-selective RMS, constant component, peak, peak-to-peak, crest factor, Wellhausen count, carpet level, condition guard Other user-defined characteristic values are possible.
Frequency resolution	1600, 3200, 6400 or 12800 lines Min. line width 0.0039 Hz at 50 Hz (depending on low-pass)
Measurement resolution	24 bit (A/D converter)
Power consumption	<200 mA at 24 V
Communication	Ethernet 100 Mb/s; RS485 (currently not supported)

The device can be configured using 3 software: FAG SmartWeb, FAG SmartUtility light or FAG SmartUtility. FAG SmartWeb is a web interface for direct access. FAG SmartUtility light is free and allows you to use several devices with one software, while the paid version FAG SmartUtility is suitable for central management of production machines at all sites or for data analysis.

By default, FAG SmartCheck uses preset alarm thresholds. The operating vibrations in a machine are decisively influenced by the specific operating condition. The FAG SmartCheck has an automatic learning mode to set the alarm thresholds to match the specific device. During commissioning the learning mode sets the threshold values [9].

For demonstration purposes a model of industrial production system was used, precisely its conveyor belt motors. Measured data are visualized in web application FAG SmartWeb (Fig. 7) live measurement is available in this application, and device configuration is also performed.

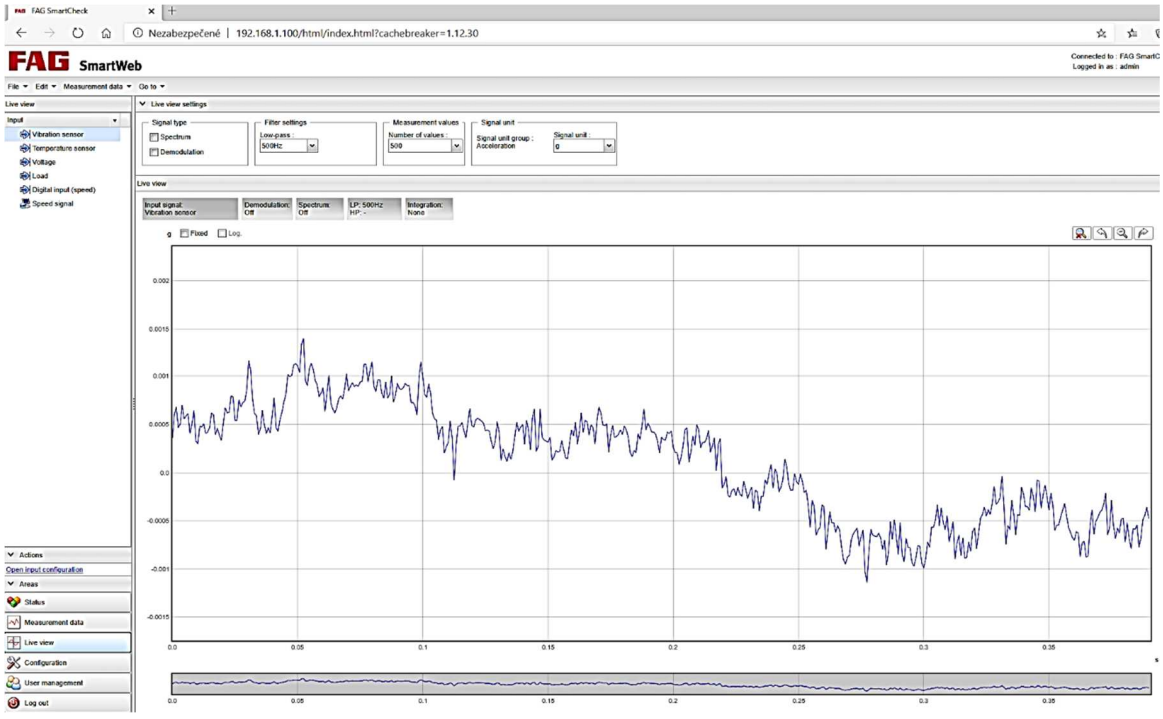


Fig. 7. SmartWeb – web interface

Other option of accessing and use of data is with PLC (programmable logic controller) and a connected HMI (human machine interface). The below listed hardware was used in our KIT:

- PLC- Mitsubishi FX5U-32M
- HMI- Mitsubishi GT2104-RTBD
- Power Supply -PSU25
- Industrial unmanaged Gigabit PoE Ethernet switch – ORing- IGPS- 1080-24V

The demonstration measurements resulted a significant difference between the two analyzed conveyor motors.



Fig. 8. HMI of Motor 1 and Motor 2 measurements

The HMI panel showed difference during the measurement of ISO 10816 -Mechanical vibration. Fig.8 displays difference of actual states. Due to time constraints the experiment had to be carried out only for a short time. The long term and maximal values were not affected by our measurements. Further experimentation will be aimed on longer monitoring.

While all the relevant data can be shown on the HMI of the Smart KIT, for more detailed view and configuration the web interface is more suitable.

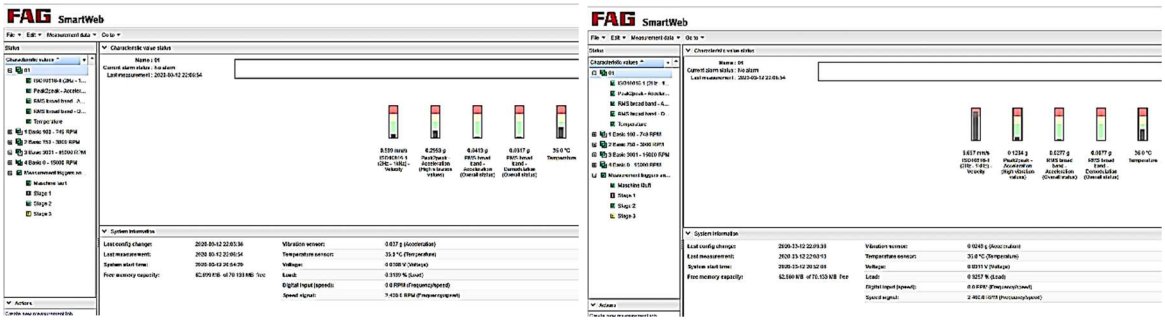


Fig. 9. Web interface of Motor 1 and Motor 2 measurements

While the first conveyor motor did not show any failure, the second motor caused mechanical vibration. This difference is visible on Fig.9, of ISO 10816-1. This measurement can provide basis for further system analysis.

In terms of time, we were not able to perform more tests on the conveyor system. Further tests and analysis will be performed on the laboratory production system in the future.

With this Smart Condition Monitoring KIT, it is not necessary to analyze separately the data, the software tool is charged for this purpose and requires expertise in signal analysis. However, the system can use the automatic learning function to detect the normal “behaviour” of the system and then detect the fault, when it occurs.

Conclusion. This paper describes, automation production monitoring systems. The modern smart monitoring systems are unique in the concept of implementation and operations because there is not necessary to interrupt production or process and it is possible to inspect different components of assets. Smart monitoring system as Mitsubishi SCM or VIKON MMP will find application in the maintenance and monitoring tasks of existing devices. The integrated smart sensor can be used as an intelligent tool via outsourced service. In the experimental part two conveyor motors were analyzed using the FAG SmartCheck system. Various configuration templates are available in the online training mode for successful system setup This training mode requires several hours of continuous operation which was currently not possible.

Finally, the carried-out experiments have shown that Mitsubishi SCM is suitable for stand-alone condition monitoring tasks and for integration into existing production systems. Thanks to simplified visualization and web application it's not necessary to understand every small aspect of the issue of processing special diagnostics signal.

Acknowledgement. This work has been supported by the Slovak Grant VEGA 1/0330/19 - Výskum a návrh algoritmov a systémov pre fúziu rôznorodých dát v multisenzorových architektúrach.

References

1. VAGAŠ,M.- GALAJDOVÁ, A. - ŠIMŠÍK, D. Nasadenie bezkontaktných ochranných zariadení do automatizovaných pracovísk, ARTEP 2020. Košice (Slovensko) : Technická univerzita v Košiciach pp. 1-6 . - ISBN 978-80-553-3487-5.

2. VAGAŠ, M. - ŠIMŠÍK, D. - GALAJDOVÁ, A. - ONOFREJOVÁ, D. Safety as necessary aspect of automated systems ICETA 2018 : Proceedings : 16th IEEE International Conference on Emerging eLearning Technologies and Applications. - New Jersey (USA) : Institute of Electrical and Electronics Engineers s. 617-622 [print]. - ISBN 978-1-5386-7912-8.

3. VAGAŠ,M.- Automated and robotized workplaces based on industry 4.0 with focus to safety issues, Interdisciplinarity in Theory and Practice : the Journal for Presentation of Interdisciplinary Approaches in Various Fields. - Arad (Rumunsko) : Adoram č. 18 (2019), s. 1-5 [print]. - ISSN 2344-2409.

4. COX.J Vibration Pen, Shock Pulse Measurement (SPM), & Vibration Analysis – What's the Difference? Available from: http://www.maintenanceworld.com/vibration-pen-shock-pulse-measurement-spm-vibration-analysis-whats-the-difference/.

5. VAGAŠ,M.- ŠIMŠÍK, D. -ONOFREJOVÁ,D. Faktory úspešného nasadenia automatizovaných riešení v kontexte priemyslu 4.0, Atp journal : priemyselná automatizácia a informatika : odborný mesačník o priemyselnej automatizácii, informatike a robotike. - Bratislava (Slovensko) : HMH 26(5), pp. 56-58. 2019[print]. - ISSN 1335-2237.

6. D'Emilia, G. – Gaspari, A. - Natale, A. Integration of model and sensor data for smart condition monitoring in mechatronic devices, 2019 II Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT (MetroInd4.0&IoT), Naples, Italy, 2019, pp. 365-370, doi: 10.1109/METROI4.2019.8792908.

7. VIKON MIVA Machine Protector MMP [online] Available from: http://www.vikon.se/produkter.php?inc=mivammp.

8. Mitsubishi Electric Smart Condition Monitoring [online] Available from: https://www.koningenhartman.nl/UserFiles/Product/Brochure/SCM%20Flyer.pdf.

9. FAG SmartCheck Machinery monitoring for every machine [online] Available from: https://www.schaeffler.com/remotemedien/media/_shared_media/08_media_library/01_publications/schaeffler_2/tpi/downloads_8/tpi_214_en_us.pdf.

УДК 681.5

Роберт Ракай, Алена Галайдова

ТЕСТУВАННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ РОЗУМНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ СТАНУ

Актуальність теми дослідження. *Сучасні тенденції в автоматизації орієнтовані на впровадження нових технологій для зниження витрат на виробництво й обслуговування. Утримання та обслуговування кожної системи промислової автоматизації має вирішальне значення.*

Постановка проблеми. *Коли інженери намагаються оптимізувати вартість виробництва і процесів, вони зазвичай знижують витрати на обслуговування. Новітні системи розумного моніторингу забезпечують значні переваги з погляду управління ризиками та зниження кількості помилок у роботі обладнання.*

Аналіз останніх досліджень і публікацій. *Для підготовки цієї статті були проаналізовані різні загальнодоступні дані, експериментальні рішення, а також висновки інших експериментів для створення бази знань з цієї теми дослідження.*

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. *Різні технології моніторингу від різних постачальників технологій автоматизації можуть працювати онлайн і офлайн . Цієї статті недостатньо, щоб описати всі з них.*

Постановка завдання. *У цій статті автоматизовані системи моніторингу було проаналізовано з точки зору проблем огляду механізмів та профілактичного обслуговування. Результати статті є основою для подальшого дослідження проблеми.*

Виклад основного матеріалу. *Щоб передбачити майбутню несправність або запобігти виходу з ладу промислового обладнання зараз, необхідно впровадити новітні технології моніторингу. Використання компактних рішень розумного моніторингу, таких як Mitsubishi SCM або VIKON MMP, забезпечує хорошу основу для вирішення таких проблем, як наприклад, несправність підшипника та його подальший вихід з ладу.*

Висновки відповідно до статті. *Ця стаття показує можливості розумного моніторингу системи промислової автоматизації. Протестована система може надати корисну інформацію про невідомі умови всередині нашого пристрою, не перериваючи роботу.*

Ключові слова: *моніторинг; обслуговування; автоматизація.*

Рис.: 9. Табл.: 1. Бібл.: 9.

Róbert Rákay – Assistent Professor, Ph.D. of technical sciences , Technical University of Kosice (Letná 9, 04200, Košice, Slovak Republic).
E-mail: robert.rakay@tuke.sk
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7151-3749
Scopus Author ID: 56922070700

Alena Galajdová –Head of the Department, professor, Ph.D. of technical sciences, Technical University of Kosice (Letna 9, 04200, Košice, Slovak Republic).
E-mail: alena.galajdova@tuke.sk
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0128-4191
Scopus Author ID: 6506796741

Rákay, R., Galajdová, A. (2020). Testing properties of smart conditon monitoring system. *Technical sciences and technologies*, *3*(21), pp. 266-273.

UDC 004.4
DOI: 10.25140/2411-5363-2020-3(21)-274-280

Michal Kelemen, Peter Ján Sinčák

PROGRAMMABLE LOGIC CONTROLLER TRAINING STANDS FOR EDUCATIONAL PURPOSES

Urgency of the research. *Programmable logic controller are devices for controlling of various systems also in industry. If controlled device is complicated, it is problem to debug application, because of risk of its damage. For this purpose is better to use hardware training stand for testing of your designed application.*

Target setting. *Training stand is as compact small device which is easy to move to another place. Also it allows to connect other hardware device for testing. Logical state hardware simulator is also designed for simulation of logic system with any user inputs with buttons or switches and also witch coloured lights for visualisation of output state.*

Actual scientific researches and issues analysis. *Training set allows to make simulation of control system with real parts before its practical use with expensive controlled system, where any mistake can cause a huge economist loses, but errors occurred during the simulation on training set only make warning and shows the weak place on design.*

Uninvestigated parts of general matters defining. *The questions of the networked structure of programmable logic controller structures are uninvestigated, so the next research will be focused to this.*

The research objective. *The main goal is to create a compact device for training future application developers with a programmable logic controller, but it is also usable for developers from practice, who need to debug the program before installing it into real operation.*

The statement of basic materials. *Existing training sets are large and expensive devices that are not easy to carry and cannot be expanded. Working with such devices is quite complicated. The designed training stand is a flexible and easily portable device.*

Conclusions. *Main contribution is that students will gain practical experiences and skills that are essential for PLC programmers. This device supports also own creativity of students, because it allows to modify hardware composition. It uses the DIN rail system similar as in real installation cabinet. The stand also includes the human-machine interface for training of practical using of these devices.*

Keywords: *Programmable logic controller; controlling; hardware; human-machine interface; ladder.*
Fig.: 10. References: 3.

Introduction. According to [1], millions of microprocessors are produced annually, but only less than 1 % is used in conventional computers. The vast majority are used as a control system in other embedded systems. Proof of this is the number of microprocessor-containing devices around us that we encounter on a daily basis. These include such devices as cars, ATMs, refrigerators, washing machines, dryers, dishwashers, copiers, CD and DVD drives, mobile phones, air conditioners, heating systems, aircraft, trains, traffic lights, gate systems, satellites, etc. In all products, their main task is to extend product properties and create intelligent product properties. The main goal is to make life easier for a person and increase their safety and comfort. In some products, such as automobiles, aircraft have dozens of such microprocessors integrated in those products.

Customers prefer products with a degree of intelligence that brings new features to the product that make it easier to use. A typical example is a car, which contains dozens of embedded microprocessors for the control of individual processes in the car. The aim is to increase the comfort of using the car and also human safety. Aircrafts are also filled with microprocessors, which take care of the safety of the aircraft and take on a number of complex and demanding tasks. Thus, a certain part of the responsibility is transferred to these microprocessors, which clearly make a person's life easier. Many other daily consumption products around us are filled with microprocessors and we often do not realize that only with their help some products can work. Often we don't even realize how dependent on these microprocessor-controlled systems we are.

A special part of microprocessor applications is “programmable logic controller” (also called “PLC”), which are the core mainly in industrial facilities, where they take over the function of controlling complex industrial processes. These are industrial control systems, that obtain information from sensors and then implement logical operations, where they compare the desired value of the variable with the actual one and implement an action intervention in the controlled system using actuators. PLC controllers are designed to handle real-time parallel control operations and are resistant to electrical noise and vibration and shock, which are very common in industrial environments.

© Міхал Келемен, Пітер Ян Сінчак, 2020

The history of PLC controllers dates back to 1964, when the first PLC called MODICON 084 [2] was introduced in order to replace expensive and extensive panels with complicated structures composed of electromagnetic relays. The relay in this period was a module with a limited life and a speed of information processing was limited by the electromechanical principles of relay operation. Even then, it was a PLC system with exceptional mechanical robustness and the ability to operate continuously.

At present, PLC controllers are based on microprocessors and are placed in racks together with other electrical modules and are not normally accessible to ordinary users. For communication with the user, the PLCs are equipped with a human-machine interface (HMI), which allows a user to control the status of a controlled system and can intervene in the control process if required by the situation in the controlled process.

PLC control systems are installed in devices with high electrical voltage, where there is a risk of electric shock, and thus only the technician, who has the appropriate authorizations in connection with the safety of work with electrical equipment has direct access to the hardware of PLC control systems. In many cases, the controlled system is a technological system, the costs of which are high, so it is important that only authorized persons work with the PLC control system.

The main aim of this paper is to present the training set for educational purpose for students on bachelor and master study on studying “Industrial mechatronics” programme. Students have to prepare for designing control structure with PLC also from practical viewpoint. Students can build practical systems with real PLC and other parts used in real systems. This approach helps to bring more practical experiences to students and improve their capability and knowledge in area of design of control systems including the PLC controllers. PLC programmer cannot be a perfect specialist without practical knowledge. Also training set allows to make simulation of control system with real parts before its practical use with expensive controlled system, where any mistake can cause a huge economist loses, but errors occurred during the simulation on training set only make warning and shows the weak place on design. Also training set can allows to simulate abnormal situation, which cannot be trained on real systems as extreme low temperatures, extreme high velocities etc. [3].

1. PLC control system concept. Concept of controlled system based on PLC (fig. 1) consists of sensors of all relevant quantities. Another part is number of actuators as relays, motors, solenoids and pumps etc., which make a suitable action into controlled systems. The report about the processes to standard user can be shown on indicator lights or signal column also called light tower, buzzers etc. The user command can be obtained through the buttons or switches (also emergency stop buttons). If it is necessary, PLC also includes touchable LCD panel as human-machine interface (“HMI”).

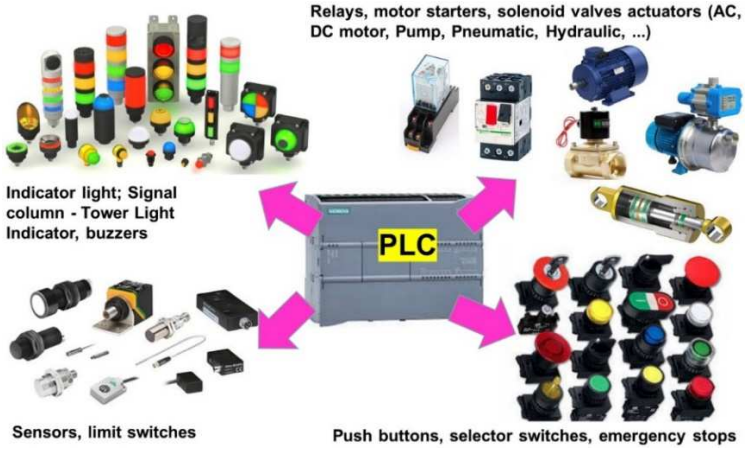


Fig. 1. Concept of controlled system including the PLC controller

Programmable logic controller PLC (fig. 2) consists of main core unit, where the central processing unit CPU, all types of memories, communication busses and other support devices are placed. Inputs and outputs blocks are also placed on main core, but it is possible to expand main core with another extra blocks with requested inputs or outputs. As it shown on figure 2, the PLC receives information about the followed quantities from controlled process and PLC sends any commands (if it is necessary) to outputs and to any actuator to make any action on controlled process. There are two variants of power supply arrangement. Power supply with 24V output voltage can be as separate part or to be included in main core unit of PLC. Our application is running inside the main core. The application is developed on personal computer using the development tool related to type of used PLC. Some PLC also includes human-machine interface directly on main core unit or it is presented as another module installed somewhere in structure. The CPU unit of PLC provides a PROFINET port for communication over a PROFINET network. Additional modules are available for communicating over PROFIBUS, GPRS, RS485, RS232, IEC, DNP3, and WDC networks. If it is necessary, you can build network structure with more PLC units using the Profinet network (fig. 3).

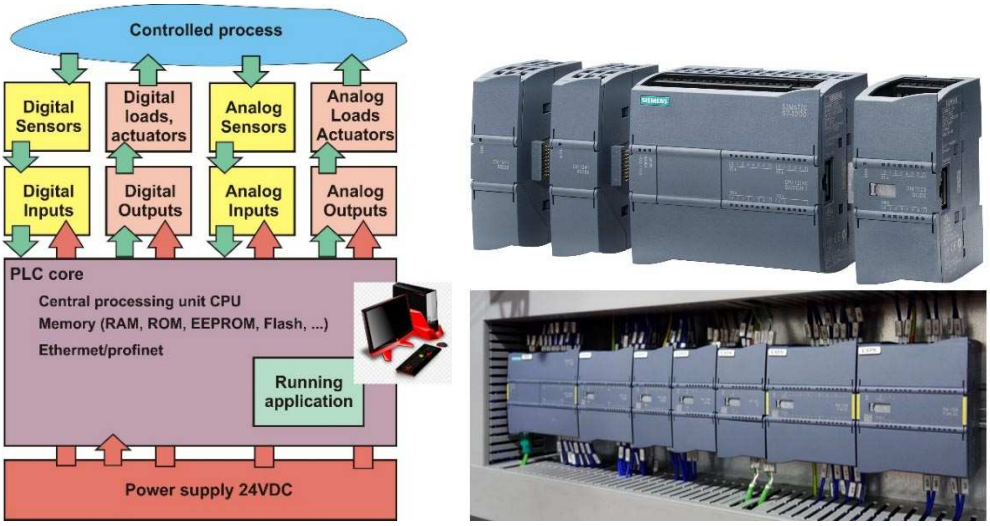


Fig. 2. Structure of PLC

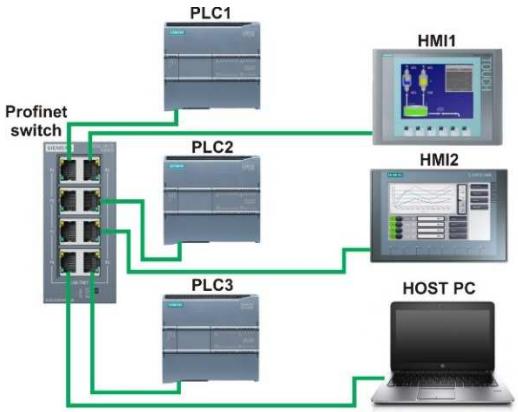


Fig. 3. Profinet network with more PLCs and HMIs



Fig. 4. Control system with PLC placed inside the rack cabinet with DIN rails

Normally, all modules are placed inside the industrial rack cabinet together with other electric components and modules (fig. 4). All parts in cabinet are fixed on DIN rails system.

After you download a program, the CPU contains the logic required to monitor and control the devices in your application. The CPU monitors inputs and changes of outputs according to the logic of this user program, which can include Boolean logic, counting, timing, complex math

operations, and communications with other intelligent devices. There are several ways how to develop program for PLC. The IEC 61131-3 [2] standard defines programming languages for programmable logic controllers (PLCs). This standard is under the control of CODESYS (Controller development system). This means that it is a development environment for programming PLC applications according to the international standard IEC 61131-3. Thanks to the IEC 61131-3 standard, we can create uniform data and program structures and control mechanisms independently of the manufacturer, PLC type, and regardless of the hardware used. The most frequently used languages for application developing are: Ladder Diagram (LD), Sequential Function Charts (SFC), Function Block (FBD), Structured Text (ST) and Instruction List (IL).

2. Training stand. Everything you need for an easy start is available Starter kits (fig. 5), which are available on the market. But it includes only pure PLC and HMI with Profinet cable and software for application developing.



Fig. 5. Starter kit without any accessories

The starter kit can be used immediately, but there are several aspects that need to be accepted. Assembly of the configuration is possible on the table, but carrying all modules with cables and other accessories is complicated then. Connection to a PLC screw terminal is also possible, but its repeated use can cause damage of the terminal and thus malfunction of the PLC, as the damaged terminal cannot be replaced. Connecting a host PC directly to the Profinet RJ-45 connector (included directly on PLC) is possible, but repeated connection and disconnection can destroy this PLC Profinet port and disable its further use. For practical training in the use of PLC, it was necessary to create a practical test stand that can be easily transferred and would form a compact unit to allow rapid creation of a prototype control system (fig. 6).



Fig. 6. Training PLC stand overall configuration (left); back side of stand with power supply and circuit breaker (middle); upper view to stand (right)

All components of training stand (fig. 6 and fig. 7) are placed on DIN rail system mounted on aluminium frame as compact device, which is easily movable. Also additional free DIN rail is available for extra selectable accessories. The training stand includes a total stop switch for turning the stand to off or on. The switch is backlit red when turned on. The stand includes ground fault protection and circuit breaker protection. The residual-current device (RCD) is located in the central electric cabinet in the laboratory. The central power supply (24V) and circuit breaker are located on the rear DIN rail. All high voltage terminals are insulated, so that they do not come into contact with live parts of the stand.

The HMI display is located at the top (fig. 7). The HMI and PLC are connected to the switch and the host PC can thus be connected to this switch and not to the PLC or HMI. This prevents damage to the RJ-45 terminal on the PLC and HMI.

The inputs and outputs of the PLC are connected to the extra terminal block and other devices will be connected to it so that the terminal block on the PLC is not damaged.

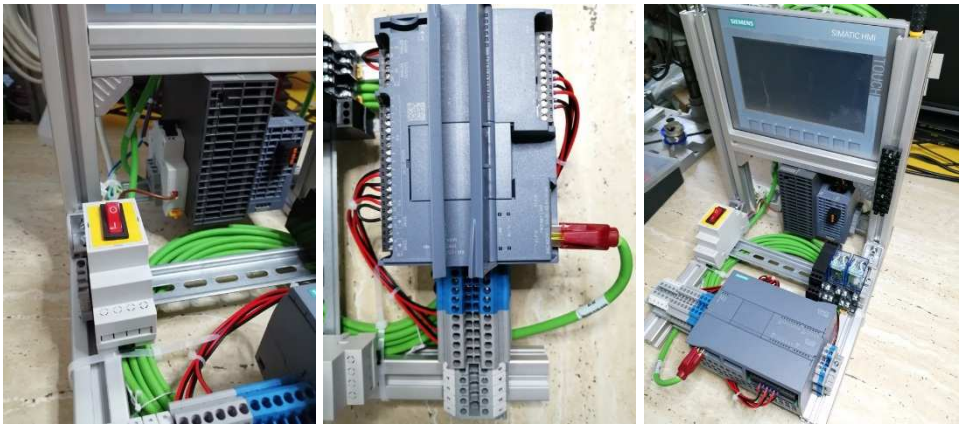


Fig. 7. Total red highlighted power switch (left); additional screw terminal (middle); Profinet switch (right)

3. Logic state hardware simulator. A logic hardware simulator (fig. 8) was created to simulate logic states at the PLC input. In addition to the commercially available signalling LEDs and buzzer on this simulator. The logic state at the input can be activated using a toggle switch or button. Signalling LEDs and a buzzer located on the simulator can be used to visualize the PLC outputs. This simulator allows you to debug the program in the PLC before connecting it to a real device and thus avoid errors and damage to the controlled device. In addition, it is possible to simulate atypical situations, which are difficult to induce on a controlled system and test the behaviour of the PLC with the program. The failure of the simulation will only alert us to an error in the program, but will not destroy the controlled device. We can fix our program and fix the errors.

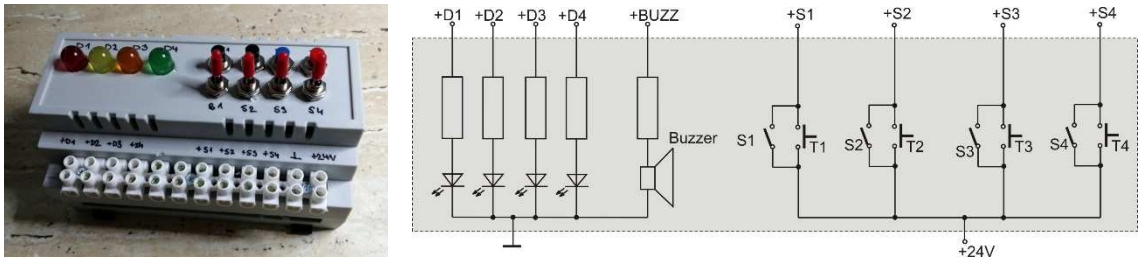


Fig. 8. Logical state hardware simulator

4. Traffic light application. The task is to make programme application and hardware realization with hardware simulator (fig. 9). There are time sequence defined for traffic light. It means that there is a time for green colour light, time for orange colour light and time for red colour light. The ladder diagram (fig. 10) consists of three timers, which defines time delay for every

colour. For complicated crossroad it is necessary to combine more lights from more sides of the crossroad. Ladder diagram is very intuitive programming, because it shows signal flow. Students also can connect logic state hardware simulator instead of real lights for testing of their program.



Fig. 9. Traffic light situation and hardware simulator

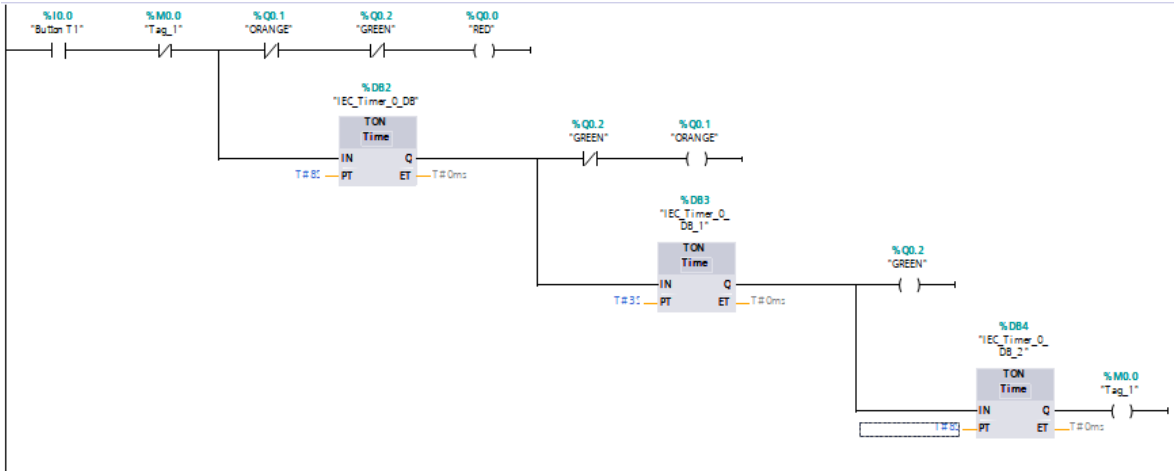


Fig. 10. Final ladder diagram for traffic light application

Conclusion. The proposed laboratory stand is a useful tool for teaching PLC control systems. It enables clear training of work with these systems. It is also possible to connect real or model hardware systems. Students will gain practical experience and skills that are essential for PLC programmers. At the same time, the test stand is a compact device that can be easily transferred and debugged on programs and applications for real controlled devices before being applied to real devices. A huge advantage is that it is possible to detect errors at an early stage of application development and it is even possible to simulate extreme situations, which is not possible with real devices.

Acknowledgement. *The authors would like to thank to Slovak Grant Agency – project KEGA 018TUKE-4/2018 supported by Ministry of Education of Slovak Republic.*

References

1. TURLEY, J. (2020) Embedded Processors by the Numbers, EE Times, January 1999. Available online: https://www.eetimes.com/embedded-processors-by-the-numbers/#. Cited 09-01-2020.

2. LANDER, A. (2019) Programmable Logic Controllers: The Evolution of a Disruptive Technology. Engineering.com. Available online: https://new.engineering.com/story/programmable-logic-controllers-the-evolution-of-a-disruptive-technology. Cited 09-01-2020.

3. Barrett, M. (2008) The Design of a Portable Programmable Logic controller (PLC) Training System for Use Outside of the Automation Laboratory, International Symposium for Engineering Education, 2008, Dublin City University, Ireland, pp. 1-5.

УДК 004.4

Міхал Келемен, Пітер Ян Сінчак

НАВЧАЛЬНІ СТЕНДИ ПРОГРАМОВАНИХ ЛОГІЧНИХ КОНТРОЛЕРІВ ДЛЯ ОСВІТНІХ ЦІЛЕЙ

Актуальність теми дослідження. *Програмований логічний контролер – це пристрій для управління різними системами, зокрема в промисловості. Якщо керований пристрій складний, налагодити додаток складно через ризик його пошкодження. Для цього найкраще використовувати апаратний навчальний стенд для тестування розробленої вами програми.*

Постановка проблеми. *Стенд для тренувань - це компактний невеликий пристрій, який легко перенести в інше місце. Також це дозволяє з'єднати обладнання для тестування. Апаратний симулятор логічного стану також призначений для моделювання логічної системи з будь-якими вхідними даними за допомогою кнопок або перемикачів, а також із кольоровими індикаторами для візуалізації вихідних даних.*

Аналіз останніх досліджень і публікацій. *Навчальний пристрій дозволяє здійснити імітацію системи управління справжніми елементами перед практичним використанням у дорогій керованій системі, де будь-яка помилка може призвести до величезних фінансових втрат, але помилки, що виникли під час моделювання на навчальному стенді, лише попереджають і показують слабке місце розробки.*

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. *Питання мережевої побудови структур програмованих логічних контролерів є не дослідженими, тому на цьому буде зосереджене наступне дослідження.*

Постановка завдання. *Основна мета – створити компактний пристрій для навчання майбутніх розробників додатків з програмованим логічним контролером, який також можна було б використовувати розробниками-практикам, яким потрібно налаштувати програму перед тим, як встановити її в реальну роботу.*

Виклад основного матеріалу. *Існуючі навчальні пристрої великі та дорогі, їх непросто носити і не можна розширити. Робота з такими пристроями досить складна. Спроектований тренувальний стенд – це гнучкий та легко переносний пристрій.*

Висновки відповідно до статті. *Основна цінність полягає в тому, що студенти отримають практичний досвід та навички, необхідні програмістам PLC. Цей пристрій сприяє також креативності студентів, оскільки дозволяє змінювати апаратний склад. У ньому використовується система DIN-рейки, подібна до справжньої монтажної шафи. Стенд також включає людино-машинний інтерфейс для навчання практичному використанню цих пристроїв.*

Ключові слова: *програмований логічний контролер; управління; апаратне забезпечення; людино-машинний інтерфейс; реле.*

Рис.: 10. Бібл.: 3.

Kelemen Michal – Prof. Ing., PhD., Faculty of Mechanical Engineering, Technical University of Kosice (Letna 9, 04200 Kosice, Slovakia).
E-mail: michal.kelemen@tuke.sk
Researcher ID: J-2845-2013
Scopus Author ID: 8396804800
ORCID ID: 0000-0003-2274-3828

Sinčák Peter Ján – Ing., PhD student, Faculty of Mechanical Engineering, Technical University of Kosice (Letna 9, 04200 Kosice, Slovakia).
E-mail: peter.jan.sincak@tuke.sk
ORCID ID: 0000-0002-6815-0262

Kelemen, M., Sinčák, Peter Ján (2020). Programmable logic controller training stands for educational purposes. *Technical sciences and technologies*, *3*(21), pp. 274-280.

РОЗДІЛ IV. ХІМІЧНІ ТА ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 664
DOI: 10.25140/2411-5363-2020-3(21)-281-285

Вікторія Челябієва, Світлана Ольшевська

ОТРИМАННЯ ТА ОЦІНКА ЯКОСТІ ХАРЧОВИХ ЖИРІВ ПІДВИЩЕНОЇ БІОЛОГІЧНОЇ ЦІННОСТІ

Актуальність теми дослідження. *Якісний склад споживаних жирів впливає на здоров'я людини Споживання мононенасичених жирів має певні переваги: веде до зниження ризику захворювань на діабет, знижує захворювання серцево-судинної системи й ожиріння. Правильне споживання жирів призводить до загального зниження ризику смертності від усіх причин.*

Постановка проблеми. *Для підвищення біологічної цінності продукту доцільним є часткова заміна молочного жиру рослинними оліями, багатими на вміст, олеїнової, лінолевої та ліноленової жирних кислот, збагачення харчових жирів цінними біологічно активними речовинами шляхом введення до їх складу, наприклад, рослинних добавок.*

Аналіз останніх досліджень і публікацій. *На сьогодні розроблені види вершкового масла з багатофункціональними рослинними харчовими добавками, які володіють лікувально-профілактичними властивостями: пектином, інуліном, кріопорошками зі столового буряка, бруньок чорної смородини, моркви, топінамбура та ін. Інший шлях підвищення біологічної цінності харчових жирів – заміна молочного жиру рослинними оліями або жирами.*

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. *У результаті проведеного аналізу виявлено, що обмежена інформація про використання куркуми, імбиру, масла какао в технології харчових жирів та жирових сумішей.*

Постановка завдання. *Дослідити вплив на якісні показники масла солодковершкового куркуми та імбиру. Розробити рослинно-жирову суміш з використанням масла какао.*

Виклад основного матеріалу. *Для отриманих зразків масла з додаванням куркуми та імбиру фізико-хімічні та мікробіологічні показники якості відповідають ДСТУ 4339:2005. Масло вершкове. Додавання куркуми та імбиру в рецептуру масла вершкового підвищує мікробіологічну чистоту готового виробу. Бактерій групи кишкової палички, дріжджів, плісняви в дослідних зразках не виявлено. Розроблена рослинно-жирова суміш, яка містить у своєму складі рослинну олію, масло какао, вершки, лецитин і пектин. Отриманий продукт має смак та запах із горіхово-шоколадним відтінком.*

Висновки відповідно до статті. *Внесення в масло солодковершкове куркуми та імбиру не впливає на органолептичні та фізико-хімічні показники якості готового продукту і, враховуючи вміст біологічно активних речовин у запропонованих добавках, сприяє підвищенню його біологічної цінності.*

З огляду на біологічну цінність і фізико-хімічні властивості масла какао воно є перспективною сировиною для використання в розробці рослинно-жирових сумішей функціонального призначення.

Ключові слова: *біологічна цінність; імбир; куркума; масло какао; рослинно-жирові суміші.*
Табл.: 1. Бібл.: 8.

Актуальність теми дослідження. Харчові жири – концентроване джерело енергії для людського організму, вони транспортують до організму розчинні в жирах вітаміни. Без жиру їжа менш смачна. Джерелами харчових жирів для організму людини є жири, які ми намазуємо на хліб, – це вершкове масло, маргарин, спред; жири, які ми використовуємо при приготуванні їжі, – олія, смалець тощо, і жири, які містяться в споживаних нами продуктах. Суттєве значення для здоров'я людини має якісний склад споживаних жирів. Наприклад, споживання занадто великої кількості насичених жирів веде до підвищення рівня холестерину в крові, що може призвести до проблем із серцем. Споживання мононенасичених жирів має певні переваги для здоров'я, а саме веде до зниження ризику захворювань на діабет, знижує захворювання серцево-судинної системи й ожиріння. Правильне споживання жирів призводить до загального зниження ризику смертності від усіх причин [1; 2].

Постановка проблеми. У молочному жирі міститься недостатня для задоволення потреб людини кількість ненасичених жирних кислот Для підвищення біологічної цінності продукту доцільним є часткова заміна молочного жиру рослинними оліями, багатими на вміст лінолевої та ліноленової жирних кислот. При цьому використання пальмової та арахісової олії не є раціональним, тому що збільшується навантаження на печінку людини у процесі споживання такого продукту [3].

Біологічно активні речовини рослинної сировини мають широкий спектр позитивної дії на організм людини, а можливість використання жирової основи як носія для транспортування біологічно активних речовин рослинної сировини до організму людини потребує детального вивчення.

© Челябієва В. М., Ольшевська С. С., 2020

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Біологічно активні речовини, що містяться в рослинній сировині, здатні протистояти руйнівній дії вільних радикалів, відновлювати порушені функції організму, запобігати онкологічним та серцево-судинним захворюванням, сповільнювати процес старіння і подовжувати активне довголіття. В останні десятиліття зусилля технологів спрямовано на обґрунтування, розроблення й виробництво нових харчових продуктів, що не тільки задовольняють потреби людини в енергії та нутрієнтах, а й чинять імуномоделюючий, біорегуляторний, реабілітаційний та інші позитивні фізіологічні впливи на органи, системи й функції організму [4]. Розроблено види вершкового масла з багатофункціональними рослинними харчовими добавками, які володіють лікувально-профілактичними властивостями, а саме пектином і інуліном, кріопорошками зі столового буряка, бруньок чорної смородини, моркви, топінамбура та ін. [5]. У вершкове масло пропонують вносити спеціально підготовлені суспензії рослинних добавок: порошку із паприки, розмеленого насіння кунжуту білого. Показано [6], що збагачена цими добавками масляна суміш характеризується високими смаковими властивостями: має чистий вершковий смак та запах із приємним присмаком кунжуту та в міру солонуватим смаком. Також як рослинні добавки до масла вершкового пропонуються сироп із ягід чорниці, порошок банана, ламінарії, порошки з малини та вишні [6].

Інший шлях підвищення біологічної цінності харчових жирів – заміна молочного жиру рослинними оліями або жирами. За отриманими результатами досліджень [7], автори очікують, що використання замінника молочного жиру «Sania» у виробництві спредів дасть змогу створити продукт із необхідною консистенцією, наближеною до вершкового масла, та оптимальним жирнокислотним складом, що задовольнятиме вимоги здорового харчування.

Особливості технології виробництва комбінованих сумішей харчових жирів дозволяє застосовувати поряд із молочними компонентами велику кількість компонентів рослинного походження, головним чином рослинних олій. Завдяки цьому комбіновані жирові суміші, порівняно з вершковим маслом, містять більшу кількість вітамінів і біологічно активних речовин, значно меншу кількість холестерину, мають споживчі переваги, наприклад, не замерзають при температурі від -4 до -12° С, мають пластичну консистенцію [8]. Підбір немолочних жирів для комбінованих сумішей повинен здійснюватися з урахуванням органолептичних властивостей, структурно-механічних показників, харчової та біологічної цінності. Молочний жир містить менше ніж 5 % незамінних поліненасичених жирних кислот, таких як лінолева, ліноленова, арахідонова, і високий вміст холестерину (від 100 до 240 мг на 100 г) [8].

Аналіз останніх досліджень і публікацій показує відсутність інформації про можливість використання спецій куркуми та імбиру, як рослинних добавок до масла вершкового. Також не висвітлено питання про використання масла какао при розробці рослинно-жирових сумішей.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. У результаті проведеного аналізу виявлено, що обмежена інформація про використання куркуми, імбиру, масла какао в технології харчових жирів та жирових сумішей.

Постановка завдання. За мету було поставлено дослідити вплив на якісні показники масла солодковершкового куркуми та імбиру, які вводились у рецептуру з метою підвищення біологічної цінності готового продукту. Розробити рослинно-жирову суміш із використанням масла какао. Оцінити органолептичні та фізико-хімічні показники отриманого готового продукту.

Виклад основного матеріалу. Масло солодковершкове отримували способом безперервного збивання вершків, із додаванням куркуми або імбиру на стадії утворення масляного зерна. Використовували: вершки за ДСТУ 8131:2015 Вершки-сировина. Технічні умови; по-

рошок куркуми за ГОСТ ISO 5562-2017 Пряности. Куркума целая и молотая (порошкообразная). Технические условия; порошок імбиру за ДСТУ ISO 1003:2018 Прянощі. Імбир (*Zingiber officinale Roscoe*). Технічні умови. Рослинні добавки вносились у кількості 0,6 % до маси готового продукту. Масова частка жиру у виробленому маслі становила 69,5 %.

Спектр впливу куркуми на організм людини дуже широкий. Крім ефірних олій, алкалоїдів, вітамінів, елементів Іоду, Фосфору, Феруму і Кальцію, у куркумі містяться куркумін – речовина, здатна пригнічувати ріст клітин злоякісних пухлин, куркумор – речовина, що сповільнює й інгібує ракові захворювання шкіри й молочних залоз, цинеол – має антипаразитарний вплив, тумерон – має антибактеріальну дію.

Імбир – сильний антиоксидант, має антибактеріальні властивості, сприяє зміцненню імунітету.

Органолептичні показники отриманих зразків масла наведені в таблиці.

Таблиця 1

Органолептичні показники масла солодковершкового з додаванням куркуми та імбиру

Показник якості	**Масло вершкове з додаванням куркуми**	**Масло вершкове з додаванням імбиру**
Смак і запах	притаманний куркумі своєрідний	притаманний імбиру
Консистенція і зовнішній вигляд	однорідна, пластична, дуже щільна, поверхня на розрізі блискуча, суха	однорідна, пластична, щільна, поверхня на розрізі слабо блискуча, суха
Колір	насичений жовтий однорідний за всією масою	світло - жовтий однорідний за всією масою

За ДСТУ 4339:2005. Масло вершкове титрована кислотність для солодковершкового масла повинна бути не більше ніж 23 °Т. Для отриманих зразків титрована кислотність плазми масла з куркумою становила 3,1 °Т, з імбирем – 5,9 °Т. кількість мезофільних аеробних та факультативно анаеробних мікроорганізмів у маслі з додаванням куркуми становила $7{,}5 \cdot 10^4$ КУО/г, у маслі з додаванням імбиру – $9{,}0 \cdot 10^4$ КУО/г, тоді як у зразку масла без додавання рослинних добавок цей показник складав $1{,}7 \cdot 10^5$ КУО/г, а за ДСТУ 4339:2005 він не повинен перевищувати $5{,}0 \cdot 10^5$. Отже, додавання куркуми та імбиру в рецептуру масла вершкового підвищує мікробіологічну чистоту готового виробу. Бактерій групи кишкової палички, дріжджів, плісняви в дослідних зразках не виявлено.

Зміну перекисного числа жиру під час зберігання вершкового масла досліджували протягом 15 діб з моменту виготовлення при температурі (3±2) °С. Увесь термін зберігання перекисне число збільшувалося в усіх зразках і змінювалось від 0,8 ½О ммоль/кг на початку зберігання до 7,0 ½О ммоль/кг на останній день зберігання. Причому у зразках з додаванням куркуми та імбиру на кінець терміну зберігання перекисне число було трохи вищим, ніж у контрольному зразку.

Для масла вершкового не введено, а от для спредів і жирових сумішей введено перекисне число як фізико-хімічний показник, яке становить під час випускання з підприємства – не більше ніж ½О 5 ммоль/кг, а після закінчення терміну придатності до споживання – ½О 10 ммоль/кг. Таким чином, отримане масло вершкове з додаванням куркуми та імбиру залишається придатним до споживання на кінець терміну зберігання.

Порівняння перекисного числа отриманого продукту з вимогами до спредів і жирових сумішей є доречним, адже при введенні рослинних добавок куркуми та імбиру отримуємо масло вершкове з функціональними добавками, які містить у своєму складі ненасичені та поліненасичені жири, поліфеноли, які здатні до окиснення, що і впливає на значення перекисного числа готового продукту.

Масло какао містить вітаміни Е і К, завдяки вмісту кофеїну має тонізуючу дію, а поліфеноли разом із вітаміном Е визначають його потужні антиоксидантні властивості. Значну частину масла какао становить стеаринова (~59,7 %) та олеїнова кислоти (~32,9 %), які здатні нормалізувати рівень холестерину. Для масла какао властивий запах шоколаду. Температура плавлення 32-35°.

За своїми властивостями та складом масло какао безсумнівно представляє інтерес для харчової промисловості. Насамперед масло какао використовують для приготування шоколаду й кондитерської глазурі. Нами вивчена можливість використання масла какао в технології рослинно-жирових сумішей. Розроблена суміш містила у своєму складі рослинну олію, масло какао, вершки, лецитин і пектин. Отриманий продукт має смак та запах з горіховошоколадним відтінком. Консистенція однорідна, пластична, м'яка. Поверхня на розрізі слабо блискуча, суха. Колір світло-жовтий. Масова частка загального жиру в отриманій суміші становила 68,7 %, масова частка вологи – 15 %, кислотність продукту – 1,6 °К.

Висновки відповідно до статті. Внесення в масло солодковершкове куркуми та імбиру не впливає на органолептичні та фізико-хімічні показники якості готового продукту і, враховуючи вміст біологічно активних речовин у запропонованих добавках, сприяє підвищенню його біологічної цінності.

З огляду на біологічну цінність і фізико-хімічні властивості масла какао воно є перспективною сировиною для розробки харчових жирів функціонального призначення.

Список використаних джерел

1. Зайцева Л. В. Роль различных жирных кислот в питании человека при производстве пищевых продуктов. *Пищевая промышленность*. 2010. № 10. С. 60–63.

2. О'Брайен Р. Жиры и масла. Производство, состав и свойства, применение: Санкт-Петербург : Профессия, 2007. 752 с.

3. Твердохлеб Г. В., Сажинов Г. Ю., Раманаускас Р. И. Технология молока и молочных продуктов. Москва :ДеЛи принт, 2006. 616 с.

4. Арпуль О. В., Усатюк О. М. Технологія ресторанної продукції оздоровчого призначення. Київ : НУХТ, 2014. 254 с.

5. Рашевская Т. А. Растительные пищевые добавки для регулирования наноструктуры сливочного масла *Сыроделие и маслоделие*. 2011. № 5. С. 49–51.

6. Барташак, Ю. В., Нєміріч, О. В., Вашека, О. М., Хуей, Д., Гавриш, А. В. Теоретичні передумови створення рецептурної композиції масляних сумішей з рослинними інгредієнтами. *Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Ґжицького. Серія: Харчові технології*. 2017. Т. 19, № 75. С. 161–165.

7. Боднарчук О. В. Конструювання жирової основи спреду *Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: Технічні науки*. 2015. № 1 (2). С. 31-36.

8. Гагач І. Л., Польовик В. В., Корецька І. Л. Спреди та суміші жирові, як нові види жирової продукції в кондитерській промисловості. *Якість і безпека харчових продуктів :* тези доп. III Міжнар. наук.-практ. конф., 16-17 листопада 2017 р. / Національний університет харчових технологій. Київ : НУХТ, 2017. С. 122-123.

References

1. Zaitseva, L. V. (2010). Rol razlichnykh zhirnykh kislot v pitanii cheloveka pri proizvodstve pishchevyh produktov. [The role of various fatty acids in human nutrition in food production] *Pishchevaia promyshlennost – Food industry*, 10, pp. 60–63.

2. O'Brajen, R. (2007). *Zhiry i masla. Proizvodstvo, sostav i svojstva, primenenie [Fats and oils. Production, composition and properties, application].* Professiia.

3. Tverdohleb, G. V., Sazhinov, G. Yu., Ramanauskas, R. I. (2006). *Tekhnologiia moloka i molochnykh produktov [Technology of milk and dairy products].* DeLi print.

4. Arpul, O. V., Usatyuk O. M. (2014). *Tekhnologiya restorannoї produkcії ozdorovchogo priznachennya [Technology of restaurant products for wellness].* NUHT.

5. Rashevskaia, T. A. (2011). Rastitelnye pishchevye dobavki dlia regulirovaniia nanostruktury slivochnogo masla [Herbal food additives to regulate the nanostructure of butter] *Syrodelie i maslodelie – Cheese and butter making,* 5, pp. 49–51.

6. Bartashak, Yu. V., Nemirich, O. V., Vasheka, O. M., Huej, D. and Gavrish, A. V. (2017) Teoretichni peredumovi stvorennya recepturnoї kompozicії maslyanih sumishej z roslinnimi ingredіentami [Theoretical reconsideration of the establishment of the recipe composition of oil sums with long-standing Ingredients]. *Naukovii visnik Lvivskogo natsionalnogo universitetu veterinarnoi*

medicini ta biotekhnolohii imeni S. Z. Gzhitskogo. Seriia: Kharchovi tekhnologiï – Scientific Bulletin of Lviv National University of Veterinary Medicine and Biotechnology Name S. Z. Ǵzhitsky. Series: food technologies, 19 (75), pp. 161–165.

7. Bodnarchuk, O. V. (2015). Konstruiuvannia zhirovoi osnovy spredu [Construction of fatty base for spread]. *Zbirnik naukovykh prats Vinnytskoho natsionalnoho ahrarnoho universitetu. Seriia: Tekhnichni nauki – Collection of Science Practices of Vinnytsia National Agrarian University. Series: Technical Sciences*, 1 (2), pp. 31–36.

8. Gagach, I. L., Polovik, V. V., Koretska, I. L. (2017). Spredy ta sumishi zhyrovi, yak novi vydy zhyrovoi produktsii v kondyterskii promyslovosti [Spreads and fat mixes as new types of fat products in the confectionery industry]. In *Yakist i bezpeka harchovih produktiv: tezy dop. III Mizhnar. nauk.-prakt. konf. – Food quality and safety: abstracts ext. III International. scientific-practical conf.* (Kyiv, November 16-17, 2017) (pp. 122-123). NUHT.

UDC 664

Viktoriia Cheliabiieva, Svitlana Olshevska

PRODUCTION AND ASSESSMENT OF QUALITY OF FOOD FATS WITH OF INCREASED BIOLOGICAL VALUE

Urgency of the research. *The quality of fats consumed affects human health. Consumption of monounsaturated fats has certain benefits: it reduces the risk of diabetes, reduces cardiovascular disease and obesity. Proper fat intake leads to an overall reduction in the risk of all-cause mortality.*

Target setting. *To increase the biological value of the product, it is advisable to partially replace milk fat with vegetable oils rich in oleic, linoleic fatty acids, enrich food fats with valuable biologically active substances by introducing into their composition, for example, plant supplements.*

Actual scientific researches and issues analysis. *To date, types of butter with multifunctional plant food additives have been developed, which have therapeutic and prophylactic properties: pectin, inulin, cryopowders from table beets, black currant buds, carrots, Jerusalem artichokes, etc. Another way to increase the biological value fat is to replace milk fat with vegetable oils or fats.*

Uninvestigated parts of general matters defining. *As a result of the analysis, it was found that there is limited information on the use of turmeric, ginger, cocoa butter in the technology of edible fats and fat mixtures.*

The research objective. *The effects of turmeric and ginger on oil quality have been studied. Cocoa butter was used to prepare vegetable-fat mixtures.*

The statement of basic materials. *Physicochemical and microbiological indicators of quality of the received samples of oil with addition of turmeric and ginger correspond to the accepted norms. The addition of turmeric and ginger in the recipe of butter increases the microbiological purity of the finished product. Bacteria of the Escherichia coli group, yeast, mold were not detected in the experimental samples.*

Developed vegetable-fat mixture, which contains vegetable oil, cocoa butter, cream, lecithin and pectin. The resulting product has a taste and smell with a nutty-chocolate hue.

Conclusions. *The addition of turmeric and ginger to the oil does not affect the organoleptic and physicochemical qualities of the finished product and, taking into account the content of biologically active substances in the proposed additives, increases its biological value.*

Cocoa butter, taking into account the biological value and physicochemical properties, is a promising raw material for use in the development of vegetable-fat mixtures of functional action.

Keywords: *biological value; ginger; turmeric; cocoa butter; vegetable-fat mixtures.*

Table: 1. References: 8.

Челябієва Вікторія Миколаївна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри харчових технологій, Національний університет «Чернігівська політехніка» (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).
Cheliabiieva Viktoriia – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Food Technology Department, Chernihiv Polytechnic National University (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).
E-mail: vika.chl@ukr.net
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-5364-4633
ResearcherID: F-7305-2014
Scopus Author ID: 6505851894

Ольшевська Світлана Сергіївна – здобувачка вищої освіти, Національний університет «Чернігівська політехніка» (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).
Olshevska Svitlana – Applicant for higher education, Chernihiv Polytechnic National University (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).
E-mail: svetlanaolshevska@ukr.net

Челябієва В., Ольшевська С. Отримання та оцінка якості харчових жирів підвищеної біологічної цінності. *Технічні науки та технології.* 2020. № 3 (21). С. 281-285.

УДК 628.35
DOI: 10.25140/2411-5363-2020-3(21)-286-292

Жанна Замай, Валентина Дзюба, Наталія Буяльська

ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ДООЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД МОЛОКОПЕРЕРОБНИХ ЗАВОДІВ ЗА ДОПОМОГОЮ БІОПРЕПАРАТІВ

Актуальність теми дослідження. *У зв'язку з тим, що більшість харчових виробництв залежно від галузі, асортименту продукції, що виробляється, сезонності та інших факторів, мають різний склад стічних вод, дослідження нових ефективних технологій біологічного водоочищення для конкретних виробництв є актуальним.*

Постановка проблеми. *Стічні води підприємств молокопереробної галузі характеризуються високим вмістом органічних домішок, завислих речовин, можуть мати несприятливий для біологічного очищення вміст біогенних елементів і значення pH, тому ефективність очищення води може залишатися досить низькою. І нагальною проблемою сьогодення є удосконалення наявних і розробка новітніх технологій очищення стічних вод на підприємствах галузі.*

Аналіз останніх досліджень та публікацій. *Дослідження використання біопрепаратів для очищення природних і штучних водойм, побутово-господарських та стічних вод багатьох підприємств обґрунтовані та представлені в роботах багатьох відомих українських та закордонних учених.*

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. *Незважаючи на численні дослідження, у літературних джерелах недостатньо даних щодо ефективності застосування біопрепаратів для очищення стічних вод молокопереробних підприємств.*

Постановка завдання. *Метою роботи було визначення можливості та ефективності доочистки стічних вод молокопереробних підприємств за допомогою біопрепаратів. Досліджували вплив біопрепаратів «Гріз-Тріт», «Лагун-Тріт», «Біо-Р», «Понд-Тріт» на гідрохімічні показники стоків ПрАТ «Новгород-Сіверський сирзавод».*

Виклад основного матеріалу. *Показано можливість використання біопрепаратів торгової марки «Мікрозим» у технології очищення стічних вод сирзаводів. Ефективність доочищення стічних вод перевірялась шляхом визначення хімічної потреби кисню (ХПК), вмісту фосфатів, амонію сольового та заліза загального до та після внесення біопрепарату.*

Висновки відповідно до статті. *Найбільш ефективним для доочищення стічних вод є біопрепарат «Понд-Тріт». При його використанні ХПК знижується у 18,9 раза, вміст амонію сольового – у 4,5 раза, фосфатів – у 4,7 раза, заліза загального – у 3,6 раза.*

Ключові слова: *стічні води; молокопереробні підприємства; біопрепарати; гідрохімічні показники; біологічне очищення стічних вод.*

Табл.: 3. Бібл.: 15.

Актуальність теми дослідження. Як відомо, харчова та переробна промисловість має достатньо велику кількість невирішених екологічних проблем, серед яких насамперед виділяють величезні обсяги стічної води. Учені активно займаються розробкою технологій очищення стічних вод харчових виробництв і перспективність застосування багатоступеневих технологій їх біологічного очищення доведена. Однак у зв'язку з тим, що більшість харчових виробництв залежно від галузі, асортименту продукції, що виробляється, сезонності та інших факторів мають різний склад стічних вод, дослідження нових ефективних технологій біологічного водоочищення для конкретних виробництв є актуальним.

Постановка проблеми. Сучасне харчове виробництво характеризується складною технологією, великою кількістю операцій, супроводжується утворенням побічної сировини, зокрема сироватки, та висококонцентрованих за вмістом органічних сполук, але зазвичай нетоксичних стічних вод. Серед відомих методів очищення стічних вод молокопереробних заводів найбільш економічно обґрунтованим та одночасно ефективним є біологічне очищення [1–3].

Однак у зв'язку з тим, що вказані стоки є висококонцентрованими за вмістом органічних домішок, завислих речовин, вони можуть мати несприятливий для біологічного очищення вміст біогенних елементів і значення pH.

Нині лічені підприємства харчової промисловості і, зокрема, молокопереробні, забезпечені власним комплексом споруд для очищення стічних вод. Їхні стоки містять компоненти перероблюваної сільськогосподарської сировини, що, як і всі речовини біологічної природи, можуть бути окиснені. Скидання таких вод без очищення в міські каналізаційні мережі не дозволяється, оскільки потрапляння їх у природні водоймища призводить до погіршення умов життєдіяльності гідробіонтів через те, що на окиснення цих речовин витрачається кисень, який розчинений у воді і є одним із найважливіших умов життєдіяльності водної біоти [4].

© Замай Ж. В., Дзюба В. А., Буяльська Н. П., 2020

Біохімічний метод очищення заснований на використанні мікроорганізмів, які в процесі своєї життєдіяльності розкладають переважну більшість складних органічних речовин до вуглекислого газу і води. На великих харчових підприємствах застосовують анаеробно-аеробне руйнування забруднюючих речовин. Застосування двоступеневого очищення зумовлено високими концентраціями забруднюючих речовин і різними швидкостями окиснення окремих компонентів.

Показник pH стічних вод харчової промисловості значною мірою визначається видом перероблюваної сировини і застосуванням лужних засобів для миття обладнання. Для деяких підприємств він може коливатися в значних межах, виходячи за межі значень, рекомендованих для біологічного очищення (6,5–8,5), що вимагає попереднього корегування величини pH за допомогою хімічної нейтралізації. У більшості випадків корегуванню підлягає також вміст у стічних водах біогенних елементів, який може виявитися недостатнім для нормального здійснення процесу біологічного очищення в аеротенках [5].

Усі розглянуті закономірності характерні і для стічних вод молокозаводів, однак концентрація забруднень суттєво залежить від асортименту продукції підприємства. Так, стічні води підприємств, основною продукцією яких є вершкове масло, твердий сир, мають достатньо концентровані стічні води (ХПК – до 5000 мгO_2/л). Тому удосконалення існуючих і розробка новітніх технологій очищення стічних на підприємствах галузі залишається нагальною проблемою сьогодення.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Теоретичним і практичним аспектам ефективного використання природних ресурсів, зокрема водних, на підприємствах харчової промисловості присвячені роботи багатьох провідних учених, зокрема П. П. Борщевського, Б. М. Данилишина, Л. В. Дейнеко, С. І. Дорогунцова, А. О. Заінчковського, М. Я. Лємєшева, М. М. Ліпатова, М. А. Хвесика, Л. Г. Чернюк та інших. Але ефективність використання та очищення води на згаданих підприємствах є досить низькою.

Автори роботи [1] вказують, що для очищення стічних вод молокопереробних підприємств малої потужності найбільш доцільна двоступенева схема з анаеробним очищенням на першому ступені та аеробним на другому. З іншого боку, одним із методів біологічного очищення природних, побутових і стічних вод є використання біопрепаратів. Як стверджують виробники [6], біопрепарати можуть бути використані для комплексного біологічного очищення стічних вод молочних, м'ясо-, рибопереробних, маслоекстракційних, пивоварних, цукрових заводів, підприємств легкої промисловості, нафтохімічного комплексу, тваринницьких комплексів. Біопрепарати можуть застосовуватись в аеротенках, відстійниках, біологічних ставках, накопичувачах. На сьогодні проведено багато досліджень ефективності застосування різних препаратів для очищення стічних вод, зокрема тих, що утворюються на підприємствах молочної промисловості [7–10].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Попередні дослідження препаратів торгової марки «Мікрозим» показали, що вони діють з різною ефективністю на різні досліджувані об'єкти. Тому пошук біопрепаратів саме для очищення стічних вод підприємств молокопереробної галузі залишається невирішеним завданням.

Метою статті було визначення можливості та ефективності доочистки стічних вод підприємств молокопереробної галузі за допомогою біопрепаратів. Досліджували вплив біопрепаратів «Гріз-Тріт», «Лагун-Тріт», «Біо-Р» «Понд-Тріт» на гідрохімічні показники стоків ПрАТ «Новгород-Сіверський сирзавод».

Виклад основного матеріалу. Об'єктом цього дослідження були стічні води ПрАТ «Новгород-Сіверський сирзавод» – одного з провідних підприємств молочної галузі Чернігівщини, що на сьогодні виготовляє 29 видів сирів та вершкове масло [11].

Обрані для дослідження біопрепарати «Гріз-Тріт», «Лагун-Тріт», «Біо-Р» «Понд-Тріт») не токсичні, не містять патогенних чи умовно патогенних мікроорганізмів, генетично модифікованих організмів, не шкідливі для людини, риб, комах, рослин, зоопланктону. Не створюють кислого або лужного середовища, не корозійні, не є забрудниками ґрунтів, води, повітря, повністю біологічно розкладаються. Активні за температури від 2 °С. Легко переносять від'ємні температури, утворюють спори та переходять у стан спокою. Стійкість до агресивних середовищ: pH 5–9, хлор – не більше 35 мг/л, відсутність сильних кислот і лугів, високих концентрацій бактерицидів, антисептиків [6]. Характеристика препаратів наведена нижче.

«Понд-Тріт». Сухий концентрат біологічного очищення і відновлення водойм, що містить 6–12 видів природних аеробних факультативних мезофільних мікроорганізмів, для яких основним джерелом енергії є органічні речовини і поживні сполуки нітрогену, фосфору в воді і донних відкладеннях.

«Лагун-Тріт». Містить 6–12 видів природних ґрунтових аеробних факультативних сапрофітних мікробів і ферментів, взаємною дією яких здійснюється очищення води і донних відкладень від органічного забруднення.

«Гріз-Тріт». Використовується для утилізації твердих жирів і очищення стічних вод. Містить унікальну композицію 12 штамів строго сапрофітних факультативних аеробних мікроорганізмів, джерелом життєдіяльності яких є практично всі фракції жирів і натуральних ферментів, загальною дією яких є розрідження і комплексна редукція твердих жирів на CO_2 і H_2O.

«Біо-Р». Біологічний препарат із вмістом ензимів та вибраних штамів нешкідливих бактерій, призначений для розкладання та ліквідації нечистот, крохмалю, целюлози, рослинних і тваринних жирів та олій, залишків після господарських тварин та інших відходів біологічного походження [7].

Для з'ясування можливості доочищення стічних вод сирзаводу біопрепарати додавали до стоків після анаеробної ємності. Графік внесення, кількість біопрепаратів зазначені в табл. 1.

Таблиця 1

Графік додавання біопрепаратів до проб стічної води

Тижні	Маса внесених біопрепаратів, г			
	Лагун-Тріт	Біо-Р	Гріз-Тріт	Понд-Тріт
1 тиждень	1,0	1,0	1,0	1,0
2 тиждень	0,5	0,5	0,5	0,5
3 тиждень	0,5	0,5	0,5	0,5
4 тиждень	1,0	1,0	1,0	1,0

Якість очищення стоків оцінювали шляхом визначення гідрохімічних показників води. Аналізи проводились у лабораторії Державної екологічної інспекції в Чернігівській області. Визначено ХПК [12], вміст амонію [13], фосфатів [14], заліза загального [15].

Основні гідрохімічні показники стічної води ПрАТ «Новгород-Сіверський сирзавод» під час відбору проб наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Гідрохімічні показники стічної води ПрАТ «Новгород-Сіверський сирзавод»

Показники якості води	Одиниці вимірювання	Проби води до використання біопрепаратів		ГДС
		Вхід в анаеробну ємність	Вихід з анаеробної ємності	
ХПК	мгO_2/л	1300	680	60
Вміст амонію сольового (NH^+_4)	мг/л	32,0	12,5	3,5
Вміст фосфатів (PO_4^{3-})	мг/л	28,0	14,0	4,5
Вміст заліза загального	мг/л	3,50	1,28	0,80

Під час проведення досліджень було зафіксовано перевищення гранично допустимих скидів: ХПК у 21,7 раза на вході та у 11,3 раза на виході з анаеробної ємності; вміст іонів NH_4^+ – у 9,1 і у 3,6 раза відповідно; PO_4^{3-} – у 6,2 та 3,1 раза; вміст заліза перевищував ГДС у 4,4 та 1,6 раза відповідно.

На першому тижні експерименту з досліджуваною водою візуальних змін не відбувалось, оскільки проходив адаптаційний період мікроорганізмів, що містяться в біопрепаратах, до нових умов існування, температурного режиму. Після двох тижнів експерименту почав змінюватись колір та з'явились ознаки активної життєдіяльності мікроорганізмів у відібраних пробах. Уже на третьому тижні стало помітним скупчення осаду на дні склянки.

Наприкінці четвертого тижня експерименту перевірялись проби стічних вод за гідрохімічними показниками на ефективність дії біопрепаратів, результати наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Гідрохімічні показники стічних вод після дії біопрепаратів

Показники якості води	Одиниці вимірювання	«Лагун-Тріт»	«Біо-Р»	«Гріз-Тріт»	«Понд-Тріт»
ХПК	мгO_3/л	39	37	35	36
Вміст амонію сольового (NH^+_4)	мг/л	2,50	2,70	2,85	2,79
Вміст фосфатів (PO_4^{3-})	мг/л	2,9	3,1	3,3	3,0
Вміст заліза загального	мг/л	0,37	0,39	0,37	0,36

У результаті порівняння гідрохімічних показників стічних вод до і після використання біопрепаратів були одержані наступні результати: відбулось значне зниження вмісту забруднювачів, зокрема після внесення біопрепарату «Лагун-Тріт» показник ХПК знизився у 17,4 раза, знизився вміст також інших забруднювачів: вміст амонію сольового (у 5 разів), фосфатів (у 4,8 раза), заліза (у 3,5 раза); «Понд-Тріт» – показник ХПК знизився у 18,9 раза, вміст амонію сольового – у 4,5 раза, фосфатів – у 4,7 раза, заліза – у 3,6 раза; «Біо-Р» – показник ХПК знизився у 18,4 раза, вміст амонію – у 4 раза, фосфатів – у 4,5 раза, заліза – у 3,3 рази; «Гріз-Тріт» – показник ХПК знизився у 19,4 раза, вміст амонію – у 3,8, фосфатів – у 4,2 раза, заліза – у 3,5 раза.

З'ясовано, що всі запропоновані біопрепарати є досить дієвими для очищення стічних вод молокопереробних підприємств. Незважаючи на те, що з усіх досліджуваних препаратів лише «Гріз-Тріт» рекомендовано виробниками для використання в ролі очисника стічних вод харчових виробництв, його ефективність виявилась найвищою лише за загальним показником ХПК, що є найбільш актуальним для стоків молокозаводів. Найбільше зниження вмісту заліза спостерігалось при використанні препарату «Понд Тріт», а амонію сольового – «Лагун-Тріт».

Висновки відповідно до статті. Результати визначення гідрохімічних показників стічних вод сирзаводу показали, що найбільш ефективним для доочищення від органічних речовин є біопрепарат «Понд-Тріт». При його використанні ХПК знижується у 18,9 раза, вміст амонію сольового – у 4,5 раза, фосфатів – у 4,7 раза, заліза – у 3,6 раза.

Проведені дослідження дозволяють рекомендувати використання біопрепаратів «Понд Тріт», «Лагун-Тріт» і «Гріз Тріт» для доочищення стічних вод молокопереробних підприємств, зокрема сирзаводів.

Список використаних джерел

1. Страшинська Л. В. Підвищення ефективності використання водних ресурсів на підприємствах харчової промисловості. *Економіка природокористування і охорони довкілля*. Київ, 2003. С. 120–124.

2. Дейнеко Л. В., Бриштіна В. В. Тенденції і закономірності екологічної ефективності регіонального розвитку харчової промисловості. *Природокористування і охорона навколишнього середовища*. Київ, 1998. С. 31–40.

3. Саинова В. Н., Костров А. Н. Кинетические характеристики процесса биологической очистки сточных вод масложировой промышленности. *Известия Самарского научного центра РАН*. 2011. Т. 13. № 1. С. 2081–2084.

4. Гвоздяк П. І. Біологічне очищення води. *Фізико-хімічні основи технології очищення стічних вод* : підручник / за заг. ред. А. К. Запольського. Київ, 2000. С. 479–502.

5. Відходи виробництва і споживання та їх вплив на ґрунти і природні води : навчальний посібник / за ред. В. К. Хільчевського. Київ : Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2007. 152 с.

6. Биопрепараты Микрозим. URL: https://microzyme.ua (дата звернення: 24.07.2020).

7. Замай Ж. В., Дзюба В. А., Замай А. Е. Ефективность очистки сточных вод биопрепаратами Био-Р1 ПРОМ и Фуд Палп Трит. *Энерготехнологии и ресурсосбережение*. 2011. №4. С. 66–69.

8. Замай Ж. В., Буяльська Н. П. Використання біопрепаратів в технології очистки стічних вод молокозаводів. *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2020)* : матеріали тез доповідей X Міжнародної наук.-практ. конф., 29–30 квіт. 2020 р. Чернігів : ЧНТУ, 2020. Т. 1. С. 235.

9. Performance of a commercial inoculums for the aerobic biodegradation of a high fat content dairy wastewater / Loperena L. et al. *Bioresource Technology.* 2007. Vol. 98. P. 1045–1051.

10. Schneider I., Topalova Y. Bioaugmentative Approaches for Dairy Wastewater Treatment. *American Journal of Agricultural and Biological Sciences*. 2010. Vol. 5 (4). P. 459–467.

11. Продукція. «Новгород-Сіверський сирзавод». URL: https://nssz.com.ua/ua/products/ (дата звернення: 25.07.2020).

12. МВВ 081/12-0019-01. Поверхневі води. Методика виконання вимірювань хімічного споживання кисню біхроматним окисленням (ХСК). [Чинний від 2002-09-03]. Київ, 2002. 35 с.

13. МВВ 081/12-0106-03. Поверхневі, підземні та зворотні води. Методика виконання вимірювань масової концентрації амоній-іонів фотоколориметричним методом з реактивом Неслера. [Чинний від 2004-06-30]. Київ, 2003. 17 с.

14. МВВ 081/12-0005-01. Поверхневі та очищені стічні води. Методика виконання вимірювань масової концентрації розчинених ортофосфатів фотометричним методом. [Чинний від 2002-09-03]. Київ, 2002. 16 с.

15. ДСТУ ISO 6332:2003. Якість води. Визначення заліза. Спектрометричний метод із використанням 1,10-фенантроліну (ISO 6332:1988, IDT). [Чинний від 2004-07-01]. Київ, 2004. 11 с.

References

1. Ctrashynska, L. V. (2003). Pidvyshchennia efektyvnosti vykorystannia vodnykh resursiv na pidpryiemstvakh kharchovoi promyslovosti [Improving the efficiency of the use of water resources in food enterprises]. In *Ekonomika pryrodokorystuvannia i okhorony dovkillia – Economics of Nature and the Environment* (pp. 120-124). RVPS Ukrainy NAN Ukrainy.

2. Deineko, L. V., Bryshtina, V. V. (1998). Tendentsii i zakonomirnosti ekolohichnoi efektyvnosti rehionalnoho rozvytku kharchovoi promyslovosti. In *Pryrodokorystuvannia i okhorona navkolyshnoho seredovyshcha – Nature management and environmental protection* (pp. 31-40). RVPS Ukrainy NAN Ukrainy.

3. Sainova, V. N., Kostrov, A. N. (2011). Kineticheskie kharakteristiki protsessa biologicheskoi ochistki stochnykh vod maslozhirovoi promyshlennosti [Kinetic characteristics of process of biological sewage treatment at butter-fat industry]. *Izvestiia Samarskogo nauchnogo tsentra RAN – Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, *13*(1), pp. 2081-2084.

4. Hvozdiak, P. I. (2000). Biolohichne ochyshchennia vody. In A. K. Zapolsky (Red.), *Fizyko-khimichni osnovy tekhnolohii ochyshchennia stichnykh vod – Physical and chemical basis of wastewater treatment technology* (pp. 479-502). Libra.

5. Khilchevskoho, V. K. (Ed.). (2007). *Vidkhody vyrobnytstva i spozhyvannia ta yikh vplyv na grunty i pryrodni vody : navchalnyi posibnyk [Waste of production and consumption and their impact on soil and natural waters: a textbook]*. Vydavnycho-polihrafichnyi tsentr «Kyivskyi universytet».

6. Biopreparaty Mikrozim [Biological products Microzyme]. Retrieved from https://microzyme.ua.

7. Zamai, Zh. V., Dziuba, V. A., Zamai, A. E. (2011). Effektivnost ochistki stochnykh vod biopreparatami Bio-R1 PROM i Fud Palp Trit [The Efficiency of Sewages by "Bio–P1 PROM" and "Food Pulp Treat" Biological Products Treatment]. *Energotekhnologii i resursosberezhenie – Energy Technologies & Resource Saving*, 4, pp. 66-69.

8. Zamai, Zh. V., Buialska, N. P. *Vykorystannia biopreparativ v tekhnolohii ochystky stichnykh vod molokozavodiv [The use of biological products in treatment technology of the dairy plant wastewater]*, X Mizhnarodnoi nauk.-prakt. konf. "Kompleksne zabezpechennia yakosti tekhnolohichnykh protsesiv ta system" [X International Scientific and Practical Conference "Complex quality assurance of technological processes and systems"] (Chernihiv, April 29-30, 2020). ChNTU, 2020.

9. Loperena, L., Ferrari, M. D., Saravia, V., Murro, D., Lima, C., Ferrando, L. … Lareo, C. (2007). Performance of a commercial inoculums for the aerobic biodegradation of a high fat content dairy wastewater. *Bioresource Technology,* 98, pp. 1045-1051.

10. Schneider, I., Topalova, Y. (2010). Bioaugmentative Approaches for Dairy Wastewater Treatment. *American Journal of Agricultural and Biological Sciences*, 5(4), pp. 459-467.

11. Produktsiia. «Novhorod-Siverskyi syrzavod» [Products. Novhorod-Siverskyi Cheese Factory]. Retrieved from https://nssz.com.ua/ua/products/.

12. Poverkhnevi vody. Metodyka vykonannia vymiriuvan khimichnoho spozhyvannia kysniu bikhromatnym okyslenniam (KhSK) [Surface waters. Technique for measuring the chemical oxygen consumption by dichromate oxidation (COD)]. MVV 081/12-0019-01 (September 3, 2002).

13. Poverkhnevi, pidzemni ta zvorotni vody. Metodyka vykonannia vymiriuvan masovoi kontsentratsii amonii-ioniv fotokolorymetrychnym metodom z reaktyvom Neslera [Surface, underground and recycling waters. Measuring methods for mass concentrations of ammonium-ions with photo colorimetric method with Nessler's reagent]. MVV 081/12-0106-03 (June 30, 2004).

14. Poverkhnevi ta ochyshcheni stichni vody. Metodyka vykonannia vymiriuvan masovoi kontsentratsii rozchynenykh ortofosfativ fotometrychnym metodom [Surface and purified sewage waters. Measuring methods for mass concentrations of dissolved orthophosphates with photometric method]. MVV 081/12-0005-01 (September 3, 2002).

15. Yakist vody. Vyznachennia zaliza. Spektrometrychnyi metod iz vykorystanniam 1,10-fenantrolinu (ISO 6332:1988, IDT) [Water quality. Determination of iron. Spectrometric method using 1,10-phenanthroline]. DSTU ISO 6332:2003 (July 1, 2004).

UDC 628.35

Zhanna Zamai, Valentina Dzjuba, Nataliia Buialska

THE STUDY OF THE POSSIBILITY OF THE POST-TREATMENT OF DAIRY WASTEWATER USING BIOLOGICAL PRODUCTS

Urgency of the research. *Due to the fact that most food industries have a different wastewater composition, which depends on the industry, the range of products, seasonality and other factors, the study of new effective biological water treatment technologies for specific industries is relevant.*

Target setting. *Dairy wastewater is characterized by high content of organic compounds, suspended solids, and may has an unfavorable content of biogenic elements and pH values for biological treatment, consequently, the efficiency of water use and purification remains rather low. Improvement of existing and development of new wastewater treatment technologies at the enterprises of the industry is a pressing problem of our time.*

Actual scientific researches and issues analysis. *Studies on the use of biological products for the treatment of natural and artificial water bodies, household and industrial wastewater are substantiated and presented in the works of many famous Ukrainian and foreign scientists.*

Uninvestigated parts of general matters defining. *Despite numerous studies, in the scientific literature there are not enough data on the effectiveness of the use of biological products for the dairy wastewater treatment.*

The research objective. *The aim of the work is to determine the possibility and efficiency of additional treatment of dairy wastewater using biological products. The influence of the biological products "Grease-Treat", "Lagoon-Treat", "Bio-R", "Pond-Treat" on the hydrochemical indicators of wastewater of "Novhorod-Siverskyi Cheese Factory" was studied.*

The statement of basic materials. *The possibility of using a number of biological products of the trademark Mikrozym in the technology of the treatment of the wastewater from cheese factories was studied. The efficiency of wastewater treatment was checked by determining the chemical oxygen demand (COD), the content of phosphates, ammonium salt and total iron before and after addition of a biological product.*

Conclusions. *The most effective biological product for wastewater treatment is Pond-Treat. When it is used, the COD decreases 18.9 times, the content of salt ammonium – 4.5 times, phosphates – 4.7 times, total iron – 3.6 times.*

Keywords: *wastewater; dairy enterprises; biological products; hydrochemical indicators; biological wastewater treatment.*

Table: 3. References: 15.

Замай Жанна Василівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри харчових технологій, Національний університет «Чернігівська політехніка» (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).
Zamai Zhanna – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Food Technology, Chernihiv Polytechnic National University (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).
E-mail: zamaizhanna@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2879-4677
ScopusID: 6506101557; 6506148493

Дзюба Валентина Андріївна – Заступник начальника Державної екологічної інспекції у Чернігівській області, Державна екологічна інспекція у Чернігівській області (вул. Малясова, 12, м. Чернігів, 14017, Україна).
Dzjuba Valentina – Deputy chief of State Environmental Inspectorate in the Chernihiv Region, State Environmental Inspectorate in the Chernihiv Region (12 Malyasova Str., 14017 Chernihiv, Ukraine).
E-mail: vdzjuba@ukr.net

Буяльська Наталія Павлівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри харчових технологій, Національний університет «Чернігівська політехніка» (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).
Buialska Nataliia – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Food Technology, Chernihiv Polytechnic National University (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).
E-mail: buialska@gmail.com
ORCID: http://orcid.org/ 0000-0002-6800-5604
ResearcherID: G-2935-2014
ScopusID: 57205645768

Замай Ж., Дзюба В., Буяльська Н. Дослідження можливості доочищення стічних вод молокопереробних заводів за допомогою біопрепаратів. *Технічні науки та технології.* 2020. № 3 (21). С. 286-292.

РОЗДІЛ V. БУДІВНИЦТВО ТА ГЕОДЕЗІЯ

УДК 528.481
DOI: 10.25140/2411-5363-2020-3(21)-293-300

Богдан Джуман, Федір Заблоцький

ЗАСТОСУВАННЯ КВАДРАТУРНИХ ФОРМУЛ ПРИ МОДЕЛЮВАННІ ГРАВІТАЦІЙНОГО ПОЛЯ STHA-ФУНКЦІЯМИ

Актуальність теми дослідження. *На сьогодні при побудові висотних мереж найточнішими залишаються традиційні методи геометричного нівелювання. Попри те, що застосування супутникових технологій є значно економічно вигіднішим і дозволяє отримати координати субміліметрового рівня точності, відсутність високоточних моделей геоїда не дозволяє повноцінно замінити ними традиційні методи. Тому дослідження і покращення методів і алгоритмів побудови поверхні геоїда є актуальною задачею.*

Постановка проблеми. *Є чимало методів побудови поверхні геоїда. Останнім часом дедалі більшу популярність набирають параметричні методи, в основі яких лежить використання сферичних функцій Лежандра дійсного ступеня. До основних недоліків такого роду методів можна віднести те, що вони не є ортогональними у своїй області визначення. Виняток становлять STHA-функції. Відповідно при їх використанні можна застосувати квадратурні формули (напр., другий метод Неймана). Основна проблема полягає в тому, що такі квадратури мають дуже погану збіжність, і необхідно розробити модифіковані методи, які дозволятимуть обчислювати невідомі коефіцієнти моделі з меншими витратами часу.*

Аналіз останніх досліджень і публікацій. *Розглянуто публікації, в яких висвітлено основні етапи побудови потенціальних полів з використанням сферичних функцій дійсного ступеня.*

Виділення недосліджених раніше частин загальної проблеми. *Використання STHA-функцій для побудови високоточного регіонального гравітаційного поля є практично надзвичайно складною задачею через повільну збіжність квадратурних рядів.*

Постановка завдання. *Розробити алгоритми, які дозволять покращити збіжність квадратурних рядів при використанні STHA-функцій для побудови високоточного регіонального гравітаційного поля.*

Виклад основного матеріалу. *Розроблено модифікований метод застосування квадратурних формул Гаусса при моделюванні регіонального гравітаційного поля Землі STHA-функціями. Це дозволить будувати високоточні регіональні поверхні геоїда без надмірного використання ресурсів і часу.*

Висновки відповідно до статті*. Запропоновано та апробовано методику для оптимізації обчислення невідомих гармонічних коефіцієнтів моделі регіонального гравітаційного поля з використанням квадратурних формул Гаусса.*

Ключові слова*: гравітаційне поле; модель; сферичні функції; квадратурні формули.*
Табл.: 4. Рис.: 4. Бібл.: 7.

Актуальність теми дослідження. Використання супутникових технологій дозволяє отримувати координати точки із субміліметровим рівнем точності в геодезичній системі координат. Для переходу від геодезичної до ортометричної або нормальної висоти необхідно обчислити в цій точці висоту геоїда або квазігеоїда відповідно. Сучасні моделі висот геоїда за точністю значно поступаються геодезичним висотам. Відповідно актуальним є завдання розроблення нових алгоритмів і методик для моделювання високоточних поверхонь геоїда.

Постановка проблеми. Нині відомо багато методів побудови регіональної моделі геоїда. Основними методами непараметричного моделювання можна вважати метод середньої квадратичної колокації, швидке перетворення Фур'є тощо. Своєю чергою основним методом параметричного моделювання регіонального потенціального (в тому числі гравітаційного) поля є метод SCHA [1], на основі якого побудовано інші методи, такі як ASHA, TOSCA, STHA [2; 3; 4] тощо. Незважаючи на велику кількість цих методів точність відповідних моделей складає близько 10 см, що є значно більше, аніж точність геодезичної висоти, отриманої з використанням супутникових технологій. Тому для заміни традиційних методів високоточного нівелювання супутниковими методами необхідно покращити алгоритми і методики побудови поверхні геоїда.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз публікацій [2], присвячених використанню методів параметричного моделювання регіональних гравітаційних та магнітних полів, показує, що метод STHA [4] побудови регіонального гравітаційного поля має

© Джуман Б. Б., Заблоцький Ф. Д., 2020

суттєву перевагу над всіма іншими методами, оскільки в його основі лежать функції, ортогональні на довільній сферичній трапеції. Це дає можливість при обчисленні гармонічних коефіцієнтів використовувати квадратурні формули [5; 6]. Проте використання цього методу несе за собою деякі труднощі, які необхідно мінімізувати [7].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Збіжність квадратурних рядів при використанні методу STHA для побудови регіональної моделі гравітаційного поля Землі є доволі повільною [7], що спричиняє значні труднощі при використанні цього методу. Тому необхідно виконати модифікацію зазначеного методу, яка дозволить суттєво зменшити час обчислень без втрати точності.

Постановка завдання. Вирішення поставленої задачі реалізується шляхом модифікації другого методу Неймана при його застосуванні до STHA-функцій під час моделювання регіонального гравітаційного поля Землі.

Виклад основного матеріалу. Наприкінці XX століття в роботі [1] було запропоновано використовувати для моделювання регіонального гравітаційного та магнітного полів (як наслідок, і поверхні геоїда як трансформанти гравітаційного поля) сферичні функції Лежандра дійсного ступеня, які вперше були отримані Томпсоном. Такий метод отримав назву SCHA. Функції, покладені в основу цього методу, мають такий вигляд:

$$\begin{aligned} \tilde{R}_{km}(\theta,\lambda) &= \tilde{P}_{n_k m}(cos\,\theta)\,cos(m\lambda), \\ \tilde{S}_{km}(\theta,\lambda) &= \tilde{P}_{n_k m}(cos\,\theta)\,sin(m\lambda), \end{aligned} \tag{1}$$

де $\tilde{P}_{n_k m}(cos\,\theta)$ можна знайти, використовуючи розклад у гіпергеометричний ряд F:

$$\tilde{P}_{n_k m}(cos\,\theta) = (1-cos^2\theta)^{\frac{m}{2}} \cdot F\left(m-n_k, n_k+m+1, 1+m, \frac{1-cos\,\theta}{2}\right). \tag{2}$$

У формулах (1) і (2); n – дійсний ступінь; m – цілий порядок; k – упорядкувальний індекс.

Областю визначення функцій 1 слугує сферичний сегмент, а величина ступеня n залежить від величини цього сегмента. Для візуалізації на рис. 1 зображено сферичні функції $\tilde{P}_{22.821\,0}(cos\theta)$ $(k=6)$, $\tilde{P}_{17.072\,6}(cos\theta)cos6\lambda$ $(k=6)$ та $\tilde{P}_{42.360\,6}(cos\theta)cos6\lambda$ $(k=12)$ на сегменті сфери $\theta_0 \le 25^0$.

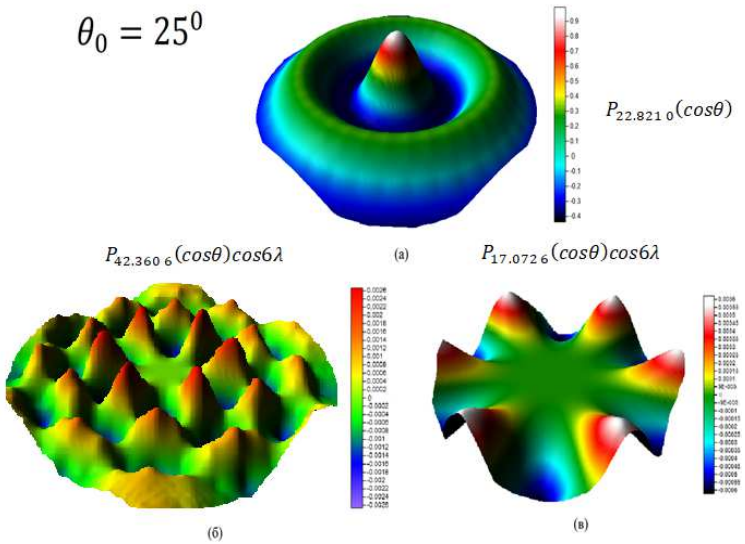


Рис. 1. Сферичні функції Лежандра на сферичному сегменті $\theta_0 \le 25^0$*:*
а – $\tilde{P}_{22.821\,0}(cos\theta)$*,* $(k=6)$*; б –* $\tilde{P}_{42.360\,6}(cos\theta)cos6\lambda$ $(k=12)$*; в –* $\tilde{P}_{17.072\,6}(cos\theta)cos6\lambda$ $(k=6)$

Незважаючи на широке використання методу SCHA [3], він має певні недоліки. Основними недоліками, на нашу думку, є те, що базові функції не є ортогональними і для використання цього методу потрібно вхідні дані трансформувати на сегмент сфери.

Для усунення даних недоліків у роботі [4] було запропоновано метод STHA, який побудовано на основі методу SCHA. STHA-функції володіють властивістю ортогональності на довільній сферичній трапеції. Загальний вигляд STHA-функцій є наступним:

$$R_{km}(\theta,\lambda) = P_{km}(\theta)\cos\left(2\pi m\frac{\lambda-\lambda_{\min}}{\lambda_{\max}-\lambda_{\min}}\right),$$
$$S_{km}(\theta,\lambda) = P_{km}(\theta)\sin\left(2\pi m\frac{\lambda-\lambda_{min}}{\lambda_{\max}-\lambda_{\min}}\right). \quad (3)$$

де $P_{km}(\cos\theta)$ можна знайти як [4]

$$\left.\begin{array}{c} P_{km}(\theta) = sin^m(\theta-\theta_{\min})\cdot F\left(m-n_k, n_k+m+1, 1+m, \frac{1-cos(\theta-\theta_{\min})}{2}\right), \\ \text{якщо } \theta_{\min}\le\theta\le\theta_{mean} \\ P_{km}(\theta) = (-1)^{k+m}sin^m(\theta_{\max}-\theta)\cdot F\left(m-n_k, n_k+m+1, 1+m, \frac{1-cos(\theta_{\max}-\theta)}{2}\right), \\ \text{якщо } \theta_{mean}\le\theta\le\theta_{\max} \end{array}\right\}, \quad (4)$$

або

$$\left.\begin{array}{c} P_{km}(\theta) = sin^m(\theta_0-|\theta-\theta_{mean}|)\cdot F\left(m-n_k, n_k+m+1, 1+m, \frac{1-cos(\theta_0-|\theta-\theta_{mean}|)}{2}\right), \\ \text{якщо } \theta_{\min}\le\theta\le\theta_{mean} \\ P_{km}(\theta) = (-1)^{k+m}sin^m(\theta_0-|\theta-\theta_{mean}|)\cdot F\left(m-n_k, n_k+m+1, 1+m, \frac{1-cos(\theta_0-|\theta-\theta_{mean}|)}{2}\right), \\ \text{якщо } \theta_{mean}\le\theta\le\theta_{\max} \end{array}\right\}, \quad (5)$$

де $\theta_{\min}, \theta_{\max}, \lambda_{\min}, \lambda_{\max}$ – координати вершин досліджуваної трапеції, $\theta_{mean} = \frac{\theta_{\min}+\theta_{\max}}{2}$, $\theta_0 = \frac{\theta_{\max}-\theta_{\min}}{2}$.

Для візуалізації на рис. 2 зображено сферичні функції $R_{6\,0}(\theta,\lambda)$, $R_{6\,6}(\theta,\lambda)$ та $R_{6\,3}(\theta,\lambda)$ на сферичній трапеції з координатами вершин $\theta_{\min} = 20^0, \theta_{\max} = 70^0$, $\lambda_{\min} = 30^0, \lambda_{\max} = 50^0$.

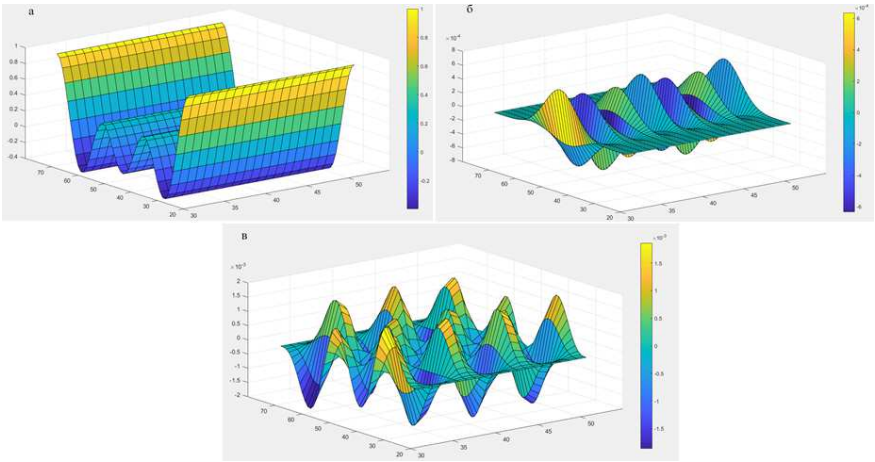


Рис. 2. Сферичні функції на сферичній трапеції з координатами вершин $\theta_{\min} = 20^0, \theta_{\max} = 70^0, \lambda_{\min} = 30^0, \lambda_{\max} = 50^0$*:*
а – $R_{6\,0}(\theta,\lambda)$*; б –* $R_{6\,6}(\theta,\lambda)$ *; в –* $R_{6\,3}(\theta,\lambda)$

Оскільки функції 3 володіють властивістю ортогональності, для обчислення невідомих коефіцієнтів моделі регіонального гравітаційного поля Землі можна використати квадратурні формули. У роботі [7] було проведено аналіз можливості застосування другого методу Неймана (квадратурних формул Гаусса) до STHA-функцій. Встановлено, що

ряд числового інтегрування збігається дуже повільно, і навіть для побудови моделей низького порядку необхідно використовувати порівняно велику сітку з вхідними даними. Виконаємо модифікацію цього методу. Для цього спершу введемо нову змінну *t*, область визначення якої $t\epsilon[2cos\theta_0 - 1; 1]$:

$$\begin{gathered} t = \cos(\theta - \theta_{\min}), \text{якщо } \theta_{\min} \le \theta \le \theta_{mean}; \\ t = 2\cos\theta_0 - \cos(\theta_{\max} - \theta), \text{якщо } \theta_{mean} \le \theta \le \theta_{\max}. \end{gathered} \tag{6}$$

Тоді функції 5 перепишуться:

$$\left.\begin{gathered} P_{km}(t) = (1-t^2)^{\frac{m}{2}} \cdot F\left(m - n_k, n_k + m + 1, 1 + m, \frac{1-t}{2}\right), \\ \text{якщо } cos\,\theta_0 \le t \le 1, \\ P_{km}(t) = (-1)^{k+m}(1-\tilde{t}^2)^{\frac{m}{2}} \cdot F\left(m - n_k, n_k + m + 1, 1 + m, \frac{1-\tilde{t}}{2}\right), \\ \text{якщо } 2\,cos\,\theta_0 - 1 \le t \le cos\,\theta_0, \end{gathered}\right\} \tag{7}$$

де $\tilde{t} = 2\,cos\,\theta_0 - t$.

Оскільки функції (7) є ортогональними на сферичній трапеції, для обчислення моделі регіонального гравітаційного поля Землі з використанням квадратурних формул необхідно знайти такі вузли θ_i і ваги ω_i, з якими виконуватиметься умова:

$$\sum_{i=1}^{N} \omega_i P_{k_1 m}(\theta_i) P_{k_2 m}(\theta_i) = min, k_1 \ne k_2. \tag{8}$$

Для модифікації методики, запропонованої в [7], знайдемо координати вузлів і ваги на відрізку $[\theta_{min}, \theta_{mean}]$, а потім продовжимо їх симетрично відносно θ_{mean}:

$$\begin{gathered} t_i = \frac{1}{2}(1 + cos\,\theta_0) + \frac{1}{2}(1 - cos\,\theta_0)x_i, \\ \omega_i = \frac{1}{2}(1 - cos\,\theta_0)c_i. \end{gathered} \tag{9}$$

Значення координат вузлів t_i та ваги ω_i до 5-го порядку на відрізку $t\epsilon[0{,}9063; 1]$ показано в табл. 1.

Таблиця 1

Координати вузлів t_i та ваги ω_i до 5-го порядку на відрізку $t\epsilon[0{,}9063; 1]$

t	ω
0,910703	0,011099
0,927929	0,022422
0,953154	0,026650
0,978379	0,022422
0,995605	0,011099

З використанням формули 9 можна обчислити координати вузлів сітки θ_i до 5-го порядку на відрізку $\theta\epsilon[20^0, 45^0]$. Ці координати та ваги показано в табл. 2.

Таблиця 2

Координати вузлів θ_i та ваги ω_i до 5-го порядку на відрізку $\theta\epsilon[20^0, 45^0]$

θ	ω
44,39733	0,011099
41,88579	0,022422
37,60697	0,026650
31,93604	0,022422
25,37380	0,011099

Остаточно обчислимо координати вузлів і ваги для відрізку $[\theta_{\min}, \theta_{\max}]$, розмістивши їх симетрично відносно θ_{mean}. Їх значення показано в табл. 3.

Таблиця 3

Координати вузлів θ_i та ваги ω_i до 5-го порядку на відрізку $\theta\epsilon[20^0, 70]$

θ	ω
25,37380	0,011099
31,93604	0,022422
37,60697	0,026650
41,88579	0,022422
44,39733	0,011099
45,60267	0,011099
48,11421	0,022422
52,39303	0,026650
58,06396	0,022422
64,62620	0,011099

На рис. 3 відображено діаграму обчислених ваг ω_i.

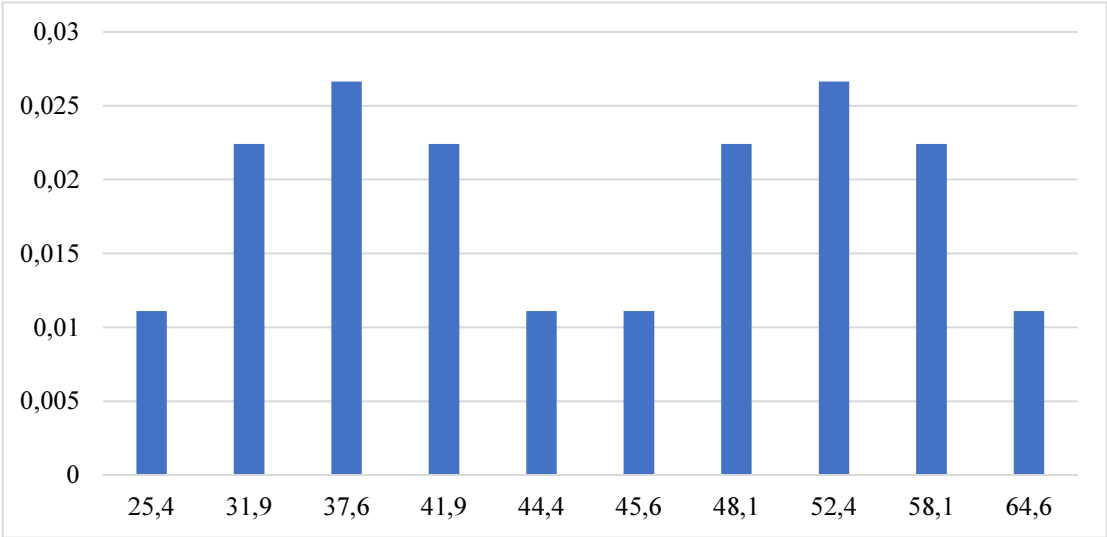


Рис. 3. Ваги ω_i для $N = 5$ на відрізку $\theta\epsilon[20^0, 70^0]$, обчислені за допомогою модифікованого методу

У табл. 4 відображено значення суми 8 до 4 ступеня/порядку для $k_1 + k_2 =$ парне число, а також $k_1 = k_2$, обчисленої у вузлах квадратури Гаусса модифікованим методом при $N = 10$.

Таблиця 4

Суми 8 для $k_1 + k_2 =$ парне число та $k_1 = k_2$ до 4 ступеня/порядку, обчисленої у вузлах квадратури Гаусса модифікованим методом при $N = 10$ на відрізку $\theta\epsilon[20^0, 70^0]$

$\sum_{i=1}^{10} \omega_i P_{20}(\theta_i) P_{00}(\theta_i)$	1,2236e-011	$\sum_{i=1}^{10} \omega_i P_{21}(\theta_i) P_{21}(\theta_i)$	0,0016
$\sum_{i=1}^{10} \omega_i P_{30}(\theta_i) P_{10}(\theta_i)$	-4,4235e-017	$\sum_{i=1}^{10} \omega_i P_{22}(\theta_i) P_{22}(\theta_i)$	6,7561e-004
$\sum_{i=1}^{10} \omega_i P_{31}(\theta_i) P_{11}(\theta_i)$	6,3988e-012	$\sum_{i=1}^{10} \omega_i P_{30}(\theta_i) P_{30}(\theta_i)$	0,0220
$\sum_{i=1}^{10} \omega_i P_{40}(\theta_i) P_{00}(\theta_i)$	-3,0026e-010	$\sum_{i=1}^{10} \omega_i P_{31}(\theta_i) P_{31}(\theta_i)$	5,8826e-004

Закінчення табл. 4

$\sum_{i=1}^{10} \omega_i P_{40}(\theta_i) P_{20}(\theta_i)$	-2,8585e-007	$\sum_{i=1}^{10} \omega_i P_{32}(\theta_i) P_{32}(\theta_i)$	7,3237e-005
$\sum_{i=1}^{10} \omega_i P_{41}(\theta_i) P_{21}(\theta_i)$	7,1005e-009	$\sum_{i=1}^{10} \omega_i P_{33}(\theta_i) P_{33}(\theta_i)$	5,0132e-005
$\sum_{i=1}^{10} \omega_i P_{42}(\theta_i) P_{22}(\theta_i)$	-1,3934e-010	$\sum_{i=1}^{10} \omega_i P_{40}(\theta_i) P_{40}(\theta_i)$	0,0171
$\sum_{i=1}^{10} \omega_i P_{00}(\theta_i) P_{00}(\theta_i)$	0,1874	$\sum_{i=1}^{10} \omega_i P_{41}(\theta_i) P_{41}(\theta_i)$	2,6565e-004
$\sum_{i=1}^{10} \omega_i P_{10}(\theta_i) P_{10}(\theta_i)$	0,0513	$\sum_{i=1}^{10} \omega_i P_{42}(\theta_i) P_{42}(\theta_i)$	1,9488e-005
$\sum_{i=1}^{10} \omega_i P_{11}(\theta_i) P_{11}(\theta_i)$	0,0101	$\sum_{i=1}^{10} \omega_i P_{43}(\theta_i) P_{43}(\theta_i)$	3,9912e-006
$\sum_{i=1}^{10} \omega_i P_{20}(\theta_i) P_{20}(\theta_i)$	0,0309	$\sum_{i=1}^{10} \omega_i P_{44}(\theta_i) P_{44}(\theta_i)$	3,9390e-006

Як можна бачити із табл. 4, значення сум при $k_1 + k_2 =$ парне число, є набагато меншими, аніж при $k_1 = k_2$, і ними можна знехтувати. Збіжність рядів чисельного інтегрування значно краща в модифікованому методі.

Для прикладу обчислимо елементи матриці нормальних рівнянь N, обчисленої з використанням вищеописаної методики на сферичній трапеції з координатами вершин $\theta_{\min} = 20^0, \theta_{\max} = 70^0, \lambda_{\min} = 30^0, \lambda_{\max} = 50^0$ до 4-го ступеня/порядку ($k_{\max} = 4$), використавши рівномірну сітку з параметрами $N = M = 10$. На рис. 4 зображено фрагмент цієї матриці (6 останніх рядків і стовпців).

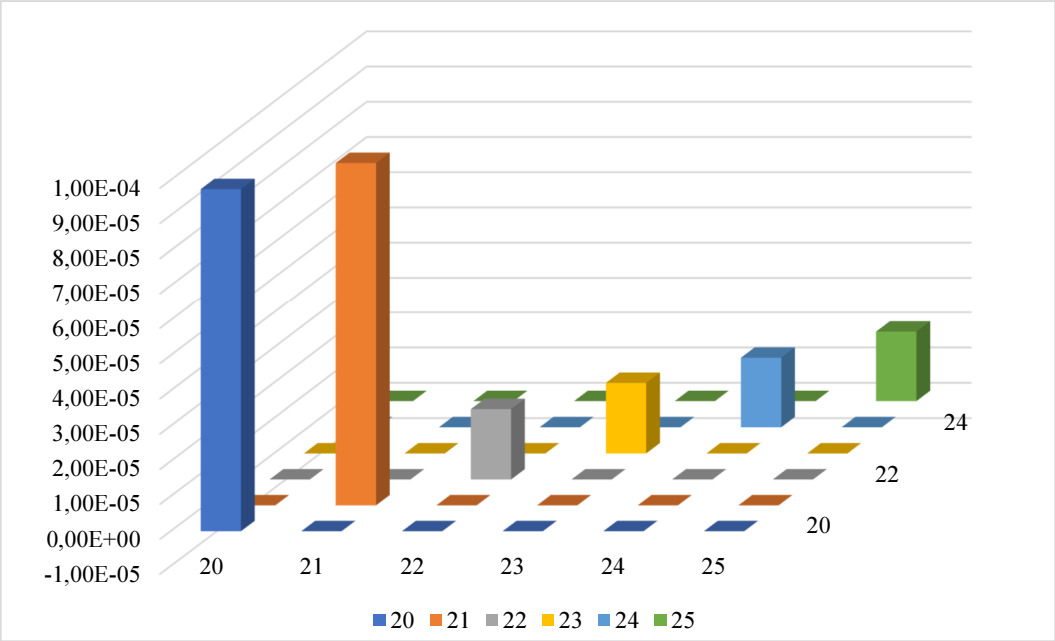


Рис. 4. Фрагмент матриці нормальних рівнянь на сферичній трапеції з координатами вершин $\theta_{\min} = 20^0, \theta_{\max} = 70^0, \lambda_{\min} = 30^0, \lambda_{\max} = 50^0$ до 4-го ступеня/порядку ($k_{max} = 4$) з використанням рівномірної сітки з параметрами $N = M = 10$

Очевидно, можна знехтувати всіма елементами матриці нормальних рівнянь за винятком елементів головної діагоналі. Для сітки з координатами вузлів θ_i $(i = \overline{1, \dots, N})$, λ_j $(j = \overline{1, \dots, M})$ будь-який елемент головної діагоналі матриці нормальних рівнянь можна знайти за формулою

$$n_{qq} = \frac{M}{2-\delta_m} \sum_{i=1}^{N} \omega_i P_{km}^2(\theta_i), \tag{10}$$

де n_{qq} – елемент головної діагоналі матриці нормальних рівнянь, а δ_m – символ Кронекера:

$$\delta_m = \begin{matrix} 1, \text{якщо } m = 0, \\ 0, \text{якщо } m \neq 0. \end{matrix} \tag{11}$$

Висновки відповідно до статті. Проаналізовано основні недоліки параметричних методів моделювання регіонального гравітаційного поля. Запропоновано методику для оптимізації обчислення невідомих гармонічних коефіцієнтів моделі регіонального гравітаційного поля з використанням квадратурних формул Гаусса. Для апробації цієї методики обчислено матрицю нормальних рівнянь на сферичній трапеції $\theta_{\min} = 20^0, \theta_{\max} = 70^0, \lambda_{\min} = 30^0, \lambda_{\max} = 50^0$.

Список використаних джерел

1. Haines G. V. Spherical cap harmonic analysis. *J. Geophys. Res*. 1985. № 90. P. 2583–2591.

2. Джуман Б. Б. Про побудову моделі локального гравітаційного поля. *Геодинаміка*. 2013. № 1(14). С. 29–33.

3. De Santis A. Conventional spherical harmonic analysis for regional modeling of the geomagnetic feld. *Geophys. Res. Lett*. 1992. № 19. P. 1065–1067.

4. Dzhuman B.B. Modeling of the gravitational field on spherical trapezium. *Geodesy, cartography and aerial photography*. 2018. Vol. 86. P. 5–10.

5. Марченко О. М., Джуман Б. Б. Побудова матриці нормальних рівнянь для моделювання локального гравітаційного поля. *Геодезія, картографія та аерознімання*. 2014. № 79. С. 29–34.

6. Sneeuw N. Global spherical harmonic analysis by least squares and numerical quadrature methods in historical perspective. *Geophys. J. Int.* 1994. № 118. P. 707–716.

7. Джуман Б. Б. Застосування другого методу Неймана до сферичних функцій на сферичній трапеції. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва.* 2018. № II(36). С. 21–24.

References

1. Haines, G. V. (1985). Spherical cap harmonic analysis. *J. Geophys. Res*., 90, pp. 2583-2591.

2. Dzhuman, B. (2013). Pro pobudovu modeli lokalnoho hravitatsiinoho polia [On the construction of local gravitational field model]. *Heodynamika – Geodynamics*, 1(14), pp. 29-33.

3. De Santis, A. (1992). Conventional spherical harmonic analysis for regional modeling of the geomagnetic feld. *Geophys. Res. Lett*., 19, pp. 1065-1067.

4. Dzhuman, B. B. (2018). Modeling of the gravitational field on spherical trapezium. *Geodesy, cartography and aerial photography*, 86, pp. 5-10.

5. Marchenko, O., Dzhuman, B. (2014). Pobudova matrytsi normalnykh rivnian dlia modeliuvannia lokalnoho hravitatsiinoho polia [Construction of the normal equations matrix for modeling of local gravitational field]. *Heodeziia, kartohrafiia ta aeroznimannia – Geodesy cartography and aerial photography*, 79, pp. 29-34.

6. Sneeuw, N. (1994). Global spherical harmonic analysis by least squares and numerical quadrature methods in historical perspective. *Geophys. J. Int.,* 118, pp. 707–716.

7. Dzhuman, B. (2018). Zastosuvannia druhoho metodu Neimana do sferychnykh funktsii na sferychnii trapetsii [Application of the second Neumann's method to spherical functions on a spherical trapezium]. *Suchasni dosiahnennia heodezychnoi nauky ta vyrobnytstva – Modern achievements of geodetic science and production,* II(36), pp. 21-24.

UDC 528.481

Bohdan Dzhuman, Fedir Zablotskyi

APPLICATION OF QUADRATURE FORMULAS IN MODELLING OF THE GRAVITY FIELD BY ASHA-FUNCTIONS

Urgency of the research. *For today for constructing altitude networks the most accurate are the traditional methods of geometric leveling. Despite the fact that the use of satellite technologies is much more cost-effective and allows to obtain coordinates of the submillimeter level of accuracy, the lack of high-precision models of geoid/quasigeoid does not allow to fully replace traditional methods. Therefore, the study and improvement of methods and algorithms for constructing the surface of the geoid/quasi-geoid is an urgent task.*

Target setting. *There are many methods of constructing the surface of the geoid. Recently, parametric methods are gaining more and more popularity, which are based on the use of spherical Legendre functions of real degree. The main disadvantages of this method include the fact that they are not orthogonal in their field of definition. Exceptions are STHA-functions. Accordingly, we can use quadrature formulas with them (eg, Neumann's second method). The main problem is that such quadratures have very poor convergence and it is necessary to develop modified methods that will allow to calculate the unknown coefficients of the model with less time.*

Actual scientific researches and issues analysis. *The publications are considered in which the main stages of construction of potential fields with use of spherical functions of real degree are covered.*

Uninvestigated parts of general matters defining. *Using STHA-functions to construct a high-precision regional gravitational field is almost an extremely difficult task due to the slow convergence of quadrature series.*

The research objective. *Develop algorithms that will improve the convergence of quadrature series when using STHA-functions to construct a high-precision regional gravitational field.*

The statement of basic materials. *A modified method of applying Gaussian quadrature formulas in modeling of the Earth's regional gravitational field with STHA-functions has been developed. This will allow to build high-precision regional surfaces of the geoid/quasigeoid without excessive use of resources and time.*

Conclusions*. A method for optimizing the calculation of unknown harmonic coefficients of the regional gravitational field model using Gaussian quadrature formulas is proposed and tested.*

Keywords*: gravitational field; model; spherical functions; quadrature formulas.*

Table: 4. Fig.: 4. References: 7.

Джуман Богдан Богданович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри вищої геодезії та астрономії, Національний університет «Львівська політехніка» (вул. С. Бандери, 12, м. Львів, 79000, Україна).
Dzhuman Bohdan – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Higher Geodesy and Astronomy, Lviv Polytechnic National University (12 S. Bandery Str., 79000 Lviv, Ukraine).
E-mail: teojuman@gmail.com

Заблоцький Федір Дмитрович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри вищої геодезії та астрономії, Національний університет «Львівська політехніка» (вул. С. Бандери, 12, м. Львів, 79000, Україна).
Zablotskyi Fedir – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Higher Geodesy and Astronomy, Lviv Polytechnic National University (12 S. Bandery Str., 79000 Lviv, Ukraine).
E-mail: fzablots@gmail.com

Джуман Б., Заблоцький Ф. Застосування квадратурних формул при моделюванні гравітаційного поля STHA-функціями. *Технічні науки та технології.* 2020. № 3 (21). С. 293-300.

УДК 528.4; 528.489
DOI: 10.25140/2411-5363-2020-3(21)-301-309

Сергій Крячок, Олена Бойко, Людмила Мамонтова

ВРАХУВАННЯ ВИМОГ ІКАО СТОСОВНО МІСЦЕВОСТІ ТА ПЕРЕШКОД У РАЙОНАХ АЕРОПОРТУ ДЛЯ ЇХ КАРТОГРАФУВАННЯ ТА ВИКОРИСТАННЯ В ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

Актуальність теми дослідження. *У межах Державної цільової програми розвитку аеропортів на період до 2023 року в Україні згідно з наказом Державної авіаційної служби України № 582 від 13.05.2019 року введено нові авіаційні правила стосовно обслуговування аеронавігаційною інформацією. Авіаційні правила розроблено з урахуванням законодавства Європейського Союзу, документів Євроконтролю, Стандартів та рекомендованої практики ІСАО.*

Постановка проблеми. *Нині для оперування аеронавігаційною інформацією удосконалюються спеціалізовані геоінформаційні системи. Вони дозволяють підвищити ступінь автоматизації управління аеронавігацією в районах аеропорту, прискорити процес розробки та випуску необхідних документів, підвищити їхню якість та, в підсумку, підвищити оперативність прийняття рішень та зменшити ризик позаштатних ситуацій.*

Аналіз останніх досліджень і публікацій. *Були розглянуті останні публікації у відкритому доступі, які присвячені використанню спеціалізованих геоінформаційних систем для оперування аеронавігаційними даними.*

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. *Аналіз публікацій дозволяє зробити висновок про необхідність підпорядкування документації для розробки сучасних аеронавігаційних геоінформаційних систем вимогам ІКАО. Згідно з наказом Державної авіаційної служби України № 582 до переліку аеронавігаційних карт, що підлягають публікації, належать електронна карта місцевості та перешкод у районах аеропорту та наповнення баз даних ГІС актуальними даними про якісні та кількісні характеристики місцевості та перешкод.*

Мета статті. *Головною метою статті є аналіз нормативних документів ІКАО та Євроконтролю стосовно характеристик місцевості та перешкод у районах аеропорту, дані про які комплектуються в базу даних спеціалізованих ГІС.*

Виклад основного матеріалу. *Розглянуто поділ повітряного простору країни на окремі райони: район 1 – вся територія держави: район 2 – територія вузлового диспетчерського району, район 3 – територія обабіч злітно-посадкової смуги, територія 4 – майданчик на торці злітно-посадкової смуги, обладнаний для виконання точних заходів на посадку по категорії II або III. Наведено вимоги до кількісних характеристик та атрибутивної інформації для відображення місцевості та перешкод в аеронавігаційних даних відповідно до районів аеропорту. Як система відліку для визначення широт і довгот перешкод чи об'єктів місцевості в міжнародній аеронавігації використовується система координат WGS-84 за версією (G1150) та ITRF 2000, а для визначення висоти взято середній рівень моря (MSL). Для переходу від геодезичних висот до висот відносно середнього рівня моря використовується гравітаційна модель Землі EGM-96, на основі якої розробляються та використовуються регіональні або місцеві моделі геоїду в районах аеропорту, які уточнюють дані EGM-96.*

Висновки відповідно до статті. *Виконано аналіз нормативних документів ІКАО та Євроконтролю стосовно якісних та кількісних вимог щодо даних про місцевість та перешкоди, що складають бази даних аеронавігаційних ГІС, залежно від районів аеропорту – для вибору методів їх картографування. Для визначення планового положення перешкод чи об'єктів місцевості в міжнародній аеронавігації застосовується система координат WGS-84 за версією (G1150) та ITRF 2000, а висота відраховується від середнього рівня моря. Для цього використовується гравітаційна модель Землі EGM-96, яка уточнюється на місцевому рівні.*

Ключові слова*: вимоги ІКАО; геоінформаційні системи (ГІС); місцевість; перешкоди в районах аеропорту; бази даних; аеронавігаційна інформація.*

Табл.: 2. Рис.: 3. Бібл.: 13.

Актуальність теми дослідження. У межах Державної цільової програми розвитку аеропортів на період до 2023 року [1] в Україні згідно з наказом Державної авіаційної служби України № 582 від 13.05.2019 року введено нові авіаційні правила стосовно обслуговування аеронавігаційною інформацією. Авіаційні правила визначають вимоги до обслуговування аеронавігаційною інформацією, яка надається на території України та в повітряному просторі над відкритим морем, який за міжнародними договорами належить до відповідальності України. Авіаційні правила розроблено з урахуванням законодавства Європейського Союзу, документів Євроконтролю, стандартів та рекомендованої практики Міжнародної організації цивільної авіації (ICAO) [2].

Постановка проблеми. Аеронавігація оперує інформацією про маршрути польотів повітряних суден, пункти донесень, перешкоди, заборонені для польотів зони та інше. Ця інформація постійно змінюється, а тому підлягає оперативному редагуванню. Донедавна підготовка аеронавігаційних даних вимагала багато «ручної праці», яка витрачалась на створення схем маршрутів, оперативних вимірювань на паперових картах, підготовку до видання тощо, що потребувало значних затрат часу.

© Крячок С. Д., Бойко О. Л., Мамонтова Л. С., 2020

Нині для оперування аеронавігаційною інформацією розробляються спеціалізовані геоінформаційні системи (ГІС). Причому у згаданому вище наказі № 582 вимагається: «електронні аеронавігаційні карти мають надаватися на основі масивів даних та використання географічних інформаційних систем». Адже ГІС дозволяють підвищити ступінь автоматизації управління аеронавігацією в районах аеропорту, прискорити процес розробки та випуску необхідних документів, підвищити їхню якість та, у підсумку, підвищити оперативність у прийнятті рішень та зменшити ризик позаштатних ситуацій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Практично вся інформація служб аеронавігації має географічний контекст, первинним джерелом якої є наземні геодезичні вимірювання та дані дистанційного зондування Землі (ДЗЗ).

До класу навігаційних можна віднести ГІС «Карта 2005». Вона має два модулі для опрацювання навігаційними даними. Перший модуль дозволяє нанести на електронну карту точки з відомими плановими та висотними координатами, які отримані GPS-приймачами, та об'єднати точки лініями на основі текстових файлів у форматі NMEA 0183. Ці дані можуть бути отримані в результаті геодезичних вимірювань та опрацьовані в блоці геодезичних задач. Другий модуль має змогу приймати навігаційні дані в режимі реального часу та виконувати відображення локації спеціальними умовними знаками на фоні картографічного зображення території. Фоновим зображенням може слугувати топографічна карта, морська карта стандарту S_57/S_52, результати космічного та аерознімання чи аеронавігаційна карта. Крім навігаційних задач, ГІС «Карта 2005» дозволяє вирішувати завдання для геодезичного та кадастрового знімання, інженерні розрахунки в цивільному та дорожньому будівництві. Також можливе виконання оверлейних операцій над списками об'єктів, виконувати мережевий аналіз для вибору оптимальних маршрутів, перерахунок координат у різні системи: WGS84, Кларка 1880 р., Кларка 1866 р., ПЗ90, СК 42 [3; 4].

Подальшим вдосконаленням ГІС «Карта 2005» є ГІС «Карта 2011». Вона дозволяє виконувати такі функції: тривимірне моделювання; побудову мозаїки зображень; створення ортофотопланів; виконувати логічні й математичні операції над списками об'єктів; проводити побудову й аналіз мережевої моделі; виконувати геодезичні та геологічні побудови й розрахунки; проєктувати в інтерактивному режимі інформаційні системи; виконувати тематичне картографування, наприклад, для потреб аеронавігації; виконувати розрахунки на площині в просторі; будувати та й аналізувати поверхні; будувати зони затоплення; виконувати обробку даних лазерного сканування; застосовувати бази даних; готувати карти до видання [5].

ГІС «Панорама» призначена для підготовки документів аеронавігаційної інформації. Комплекс є набором інструментів для: ведення бази аеронавігаційних даних, проєктування маршрутів вильоту повітряних суден, підходів та посадки; моделювання аеронавігаційної ситуації; формування аеронавігаційних карт та обміну даними з іншими ГІС у текстовому форматі ARINC424-19 та форматі метаданих AIXM 5.1 і WFS2.0. Продукт адаптований до роботи з операційними системами: Windows, Astra Linux SE, ALT Linux, Эльбрус, Ubuntu, CentOS, МСВС) та архітектур Intel, Эльбрус, КОМДИВ, PowerPC, SPARC. Комплекс розроблено згідно з документацією ІКАО [6].

Відповідно до вимог ІКАО повітряні судна (газотурбінні та поршневі) з сертифікованою масою 5700 кг та всі повітряні судна із сертифікованою масою понад 1500 кг, або на борту яких знаходиться більше ніж 30 пасажирів, повинні бути обладнані системою попередження про близькість землі, яка має функцію оцінки рельєфу та перешкод. Система попереджує екіпаж про потенційну небезпеку близькості земної поверхні у випадках: надмірного збільшення швидкості зниження повітряного судна; різкого зближення із земною поверхнею; надмірної втрати висоти під час злету чи спрямування на повторне коло; надмірного зниження відносно глісади заходження на посадку за приладами; не

випущених шасі та положенні закрилків невідповідно до посадки. Вказана система повинна мати наповнену базу стосовно рельєфу місцевості та перешкод в районах аеропортів відправки та приземлення [7; 8].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Аналіз наведених публікацій дозволяє зробити висновок про сучасну тенденцію підпорядкування документації, на основі якої виконується розробка сучасних аеронавігаційних ГІС, вимогам ІКАО. Крім того, згідно з наказом Державної авіаційної служби України № 582, до переліку аеронавігаційних карт, що підлягають публікації, належать електронна карта місцевості та перешкод у районах аеропорту та поповнення баз даних якісною та кількісною характеристикою стосовно місцевості та перешкод [2].

Мета статті. Головною метою цієї статті є аналіз нормативних документів ІКАО та Евроконтролю стосовно характеристик місцевості та перешкод у районах аеропорту, дані про які комплектуються у базу даних аеронавігаційних ГІС.

Виклад основного матеріалу. Відповідно до норм ІКАО, повітряний простір навколо аеропорту поділяється на окремі райони: 1, 2, 3, 4 – в яких регламентується набір даних про перешкоди та обмежувальні поверхні. На рис. 1 показані райони 1 та 2.

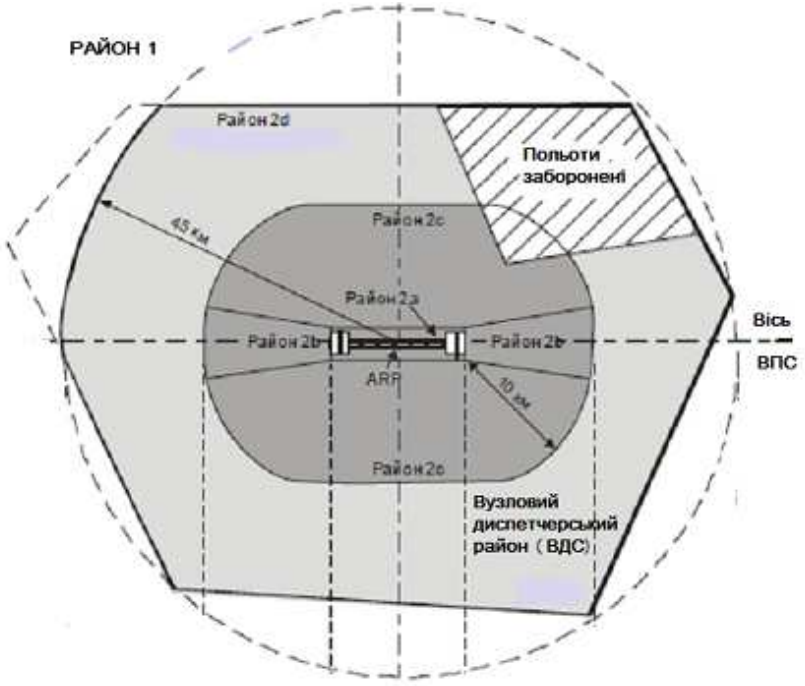


Рис. 1. Межі районів 1 та 2 аеропорту

Причому до району 1 належить вся територія держави. Район 2 поділяється на окремі райони. Район 2a – прямокутна зона навколо злітно-посадкової смуги (ЗПС), яка включає льотну смугу та будь-яку наявну смугу, що вільна від перешкод. Район 2b – зона, що охоплює місцевість від закінчення району 2a у напрямку вильоту та посадки на відстань 10 км з розходженням вгору на 15 % у кожен бік ЗПС. Район 2c – зона, що охоплює місцевість з зовнішнього боку району 2a та району 2b на відстань не більше ніж 10 км від межі району 2a. Район 2d – зона, що охоплює місцевість з зовнішнього боку районів 2a, 2b та 2c на відстань 45 км від ARP (aerodrome reference point) – контрольної точки аеродрому (умовна точка, яка визначає координати його місцеположення), або до існуючої межі вузлового диспетчерського району, залежно від того, що ближче [2; 8; 9].

Район 3 – зона (рис. 2), що межує з робочої площею аеродрому, яка в горизонтальному напрямку простягається від бічної кромки ЗПС на відстань 90 м від осьової лінії ЗПС і на відстань 50 м від бічної кромки всіх інших частин робочої площі аеродрому [2; 9].

Район 4 – зона (рис. 2), що простягається на відстань 900 м від порога ЗПС і 60 м з кожного боку продовженої осьової лінії ЗПС у напрямку заходу на посадку на ЗПС, обладнану для виконання точних заходів на посадку по категорії II або III. Там, де місцевість на відстані, що перевищує 900 м від порога ЗПС є гірською або особливою з інших міркувань, довжину району 4 слід збільшити на відстань, що не перевищує 2000 м від порога ЗПС [2; 9].

Перешкодами вважаються всі нерухомі (постійні або тимчасові) і рухомі об'єкти або частина їх, що: розташовані в зоні, яка призначена для руху повітряних суден по поверхні; або піднімаються над визначеною поверхнею, що призначена для забезпечення безпеки повітряних суден у польоті; або перебувають за межами цих визначених поверхонь і розцінюються, як такі, що небезпечні для повітряної навігації [9].

У районі 1 дані про перешкоди надаються щодо перешкод заввишки більше 100 м над землею. Для районів 2a, 2b та 2c не враховувати дані про перешкоди висотою менші за 3 та 15 м над землею відповідно (рис. 3).

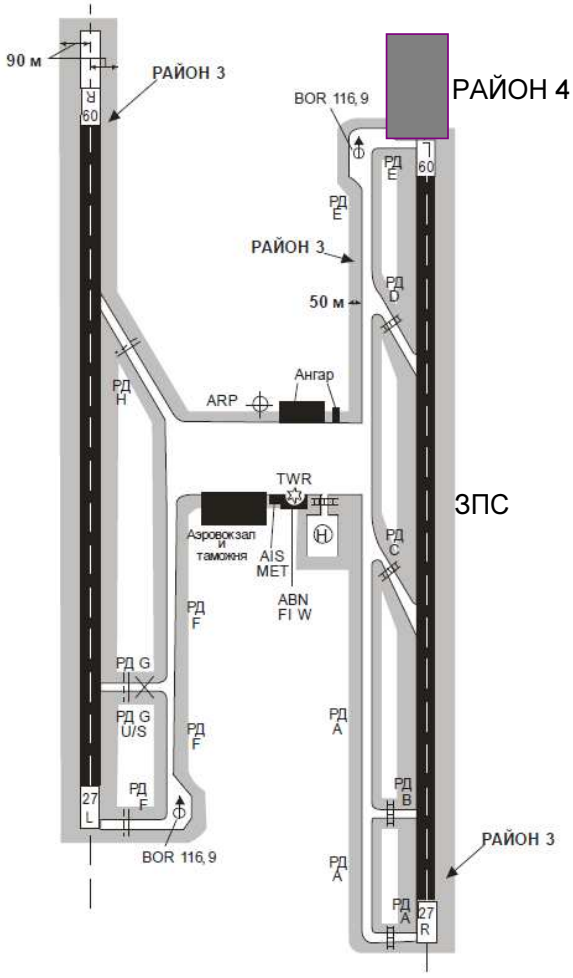


Рис. 2. Межі районів 3 та 4 аеропорту

Враховуються дані про перешкоди, які підносяться над плоскою поверхнею, що має нахил 1,2 % і має загальний початок із зоною траєкторії зльоту – райони 2b, 2c. Поверхня обліку перешкод району 2d розташована на висоті 100 м над землею [9].

Але на аеродромах, які регулярно використовуються міжнародною цивільною авіацією, надаються дані про перешкоди щодо всіх перешкод, що знаходяться в межах району 2, які згідно з оцінкою становлять небезпеку для аеронавігації. У тих зонах району 2, де виконання польотів заборонено внаслідок дуже високої місцевості або інших місцевих обмежень і/або правил, дані про місцевість відповідають кількісним вимогам для району 1 [9].

У районах 3 та 4 налаються дані про перешкоди, вищі за 3 м над землею.

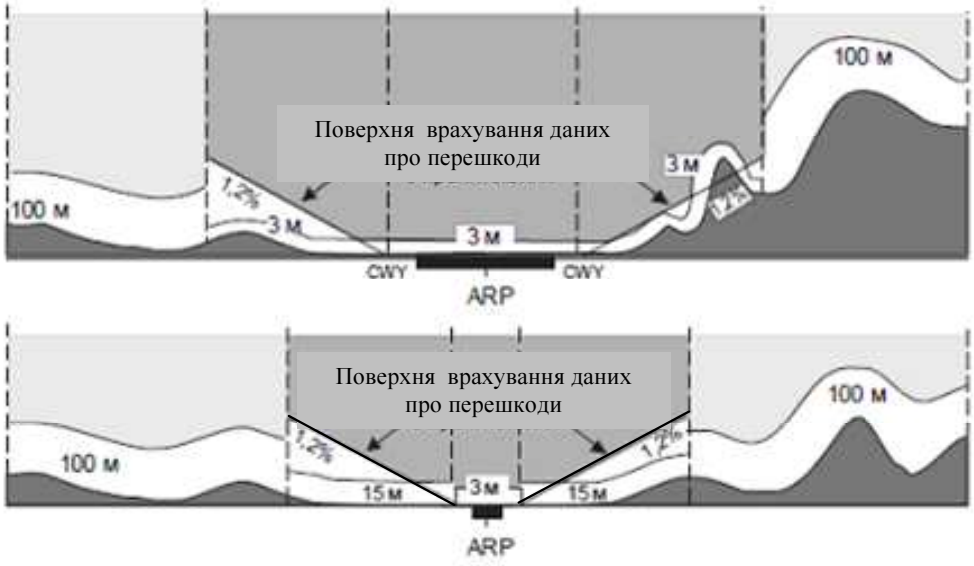


Рис. 3. Розташування поверхонь для врахування даних про перешкоди вздовж ЗПС (верхня частина малюнка) та поперек ЗПС (нижня частина малюнка)

Кількісні дані про перешкоди в районах 1 – 4 наведені в табл. 1 [9].

Таблиця 1

Кількісні вимоги щодо даних про перешкоди

Кількісні дані	**Район 1**	**Район 2**	**Район 3**	**Район 4**
Точність у вертикальній площині, м	30	3	0,5	1
Роздільна здатність у вертикальній площині, м	1	0,1	0,01	0,1
Точність у горизонтальній площині, м	50	5	0,5	2,5
Довірча ймовірність, %	90	90	90	90
Класифікація цілісності	Звичайні	Важливі	Важливі	Важливі

Примітка. Період оновлення даних – за необхідності.

Під роздільною здатністю (табл. 1) розуміють число одиниць або цифр, що визначає порядок виміряного або розрахованого значення [9]. Класифікація цілісності заснована на потенційному ризику використання викривлених даних. Застосовується така класифікація аеронавігаційних даних:

- звичайні дані – є дуже мала ймовірність того, що використання перекручених звичайних даних для безпечного продовження польоту й посадки повітряного судна будуть пов'язані зі значним ризиком і можливістю катастрофи;

- важливі дані – є мала ймовірність того, що використання перекручених важливих даних для безпечного продовження польоту й посадки повітряного судна будуть пов'язані зі значним ризиком і можливістю катастрофи;

- критичні дані: є велика ймовірність того, що використання перекручених критичних даних для безпечного продовження польоту і посадки повітряного судна будуть поєднані зі значним ризиком і можливістю катастрофи [9].

Місцевість – поверхня Землі з такими природними елементами, як гори, горби, хребти, долини, води, вічний лід, сніг, за винятком перешкод. Дані про місцевість надаються в районах 1 та 2, у зоні траєкторії польоту повітряного судна (рис 3, верхня частина малюнка) та в зонах, що знаходяться в межах бічних поверхонь обмеження перешкод аеродрому. Кількісні вимоги щодо даних про місцевість наведено в табл. 2 [9].

Таблиця 2

Кількісні вимоги щодо даних про місцевість

Кількісні дані	Район 1	Район 2	Район 3	Район 4
Інтервал між постами	3с дуги (90 м)	1с дуги (30 м)	0,6с дуги (20 м)	0,3с дуги (8 м)
Точність у вертикальній площині, м	30	3	0,5	1
Роздільна здатність у вертикальній площині, м	1	0,1	0,01	0,1
Точність у горизонтальній площині, м	50	5	0,5	2,5
Довірча ймовірність, %	90	90	90	90
Класифікація цілісності	Звичайні	Важливі	Важливі	Важливі

Примітка. Період оновлення даних – за необхідності.

Як видно з табл. 1 та 2, вимоги щодо точності визначення вертикального та горизонтального положення як перешкод, так і місцевості, роздільна здатність даних, довірча ймовірність та цілісність – однакова. Крім того, дані про місцевість та перешкоди повинні надаватись у електронному (цифровому) вигляді – для наповнення електронної бази даних про ландшафт і перешкоди [10].

За систему відліку в горизонтальній площині для міжнародної аеронавігації використовують Всесвітню геодезичну систему – WGS-84. Тому аеронавігаційні географічні координати (широти та довготи) виражають відносно геодезичної бази відліку – WGS-84. Іншою точною всесвітньою системою земних координат є земна система відліку ITRS Міжнародної служби обертання Землі (IERS). Практичною реалізацією ITRS є опорна система ITRF. Остання реалізація WGS-84 (G1150) прив'язана до початку періоду відліку ITRF 2000. WGS-84 (G1150) узгоджується з ITRF 2000, і в практичних реалізаціях різниця між цими двома системи знаходиться в межах 1–2 см для Світу загалом, що означає практичну ідентичність WGS-84 (G1150) та ITRF 2000 [10].

У міжнародній аеронавігації за систему відліку у вертикальній площині використовується прийнятий за базу MSL (mean sea level) – середній рівень моря, який забезпечує зв’язок залежних від гравітації відносних висот (перевищень) з поверхнею, що зветься геоїдом. У глобальному плані геоїд найбільше близько відповідає MLS. Залежні від гравітації відносні висоти (перевищення) є ортометричними висотами, а відстані до точок над еліпсоїдом є висотами відносно еліпсоїда. Різниці вказаних висот утворюють хвилі геоїда відносно поверхні еліпсоїда [9; 10].

За глобальну модель гравітації використовується гравітаційна модель Землі – 1996 (EGM-96), що містить детальну інформацію про поле довгих гравітаційних хвиль геоїда через градус до 360°. У географічних пунктах, де точність EGM-96 не значна, на основі даних EGM-96 розробляються та використовуються регіональні або місцеві моделі геоїду, що містять дані про гравітаційне поле з високою роздільною здатністю (короткі хвилі). У тих випадках, коли використовується інша модель геоїду замість моделі EGM-96, в AIP (Aeronautical Information Publication) – збірник аеронавігаційної інформації приводиться опис використаних моделей та необхідні параметри для попереднього перетворення відносних висот для переходу від цих моделей до EGM-96 [9; 10].

У Всесвітній геодезичній системі – WGS-84 визначаються саме висоти відносно еліпсоїда. Тому від цих висот, визначених геодезичним чи навігаційним GPS-обладнанням, необхідно перейти до ортометричних висот з урахування хвиль геоїда – розташування поверхні геоїда відносно еліпсоїда, який використовується у WGS-84 як поверхня відносності. Згідно з вимогами ICAO висоти геоїда на територіях міжнародних аеропортів повинні бути визначеними так, щоб забезпечити відтворення хвилі геоїда на рівні 25 см [11]. Така гранична похибка для довірчої ймовірності 0,95–0,997 та нормального розподілу з урахуванням коефіцієнту переходу 2,0–3,0 [12] дозволяє отримати середню квадратичну похибку визначення хвилі геоїду на рівні ±(8-12 см) [13].

Масив даних про місцевість містить масиви цифрових даних, що описують поверхню місцевості у вигляді безперервного ряду значень перевищень, які обчислюються від загальної бази значень усіх вузлах (точках) певної сітки. Сітка місцевості є кутовою або лінійною та має правильну або неправильну форму [9; 10].

Крім кількісних даних, необхідно надавати атрибутивну інформацію про місцевість. До важливої інформації віднесено такі атрибути місцевості: район охоплення; покажчик про укладача даних; покажчик про джерело даних; метод отримання; інтервал між постами; систему відліку, роздільну здатність, точність, місцезнаходження та довірчий рівень у горизонтальній площині; перевищення та його відлік; систему відліку, роздільну здатність, точність, та довірчий рівень у вертикальній площині; зареєстрована поверхня; цілісність; відмітка дати й часу; використані одиниці часу [9; 10].

У масив даних про перешкоди включаються всі типи елементів, визначені як перешкоди, і кожен із них описується відповідно до переліку обов'язкових атрибутів. Важливою інформацією про атрибути перешкод є: район охоплення; покажчик про укладача даних; покажчик про джерело даних; систему відліку, роздільну здатність, точність, місцезнаходження, довірчий рівень та розміри в горизонтальній площині; перевищення; систему відліку, роздільну здатність, точність, та довірчий рівень у вертикальній площині; тип перешкоди та його конфігурація; цілісність; відмітка дати і часу; використані одиниці часу; освітлення та маркування. До атрибутів тимчасових і рухомих перешкод належать ще й такі: відносна висота; дія та ефективність [9].

Висновки відповідно до статті. Виконано аналіз нормативних документів ІКАО та Евроконтролю стосовно якісних та кількісних вимог щодо даних про місцевість та перешкоди, що складають бази даних навігаційних ГІС, залежно від районів аеропорту – для вибору методів їх картографування. Встановлено, що як систему відліку в горизонтальній площині в міжнародній аеронавігації використовується система координат WGS-84 за версією (G1150) та ITRF 2000, а за систему відліку у вертикальній площині – середній рівень моря (MSL). Для переходу від геодезичних висот до висот відносно середнього рівня моря використовується гравітаційна модель Землі EGM-96, на основі якої розробляються та використовуються регіональні або місцеві моделі геоїду в районах аеропорту.

Список використаних джерел

1. Про затвердження Державної цільової програми розвитку аеропортів на період до 2023 року : Постанова Кабінету Міністрів України від 24.02.2016 № 126. URL: http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show.

2. Про затвердження Авіаційних правил України «Обслуговування аеронавігаційною інформацією» : Наказ Державної авіаційної служби України від 13.05. 2019 № 582. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0760-19#Text.

3. Боханов І. Застосування геоінформаційних систем в аеронавігації. *Чернігівський науковий часопис Чернігівського державного інституту економіки і управління. Сер. 2: Техніка і природа*. 2012. Вип. 1. С. 23–28.

4. ГИС Карта 2005 – расчеты по карте. URL: https://gisinfo.ru/item/31.htm.

5. ГІС «Карта 2011» URL: http://www.geoguide.com.ua/software/software.php?part=panorama&art=gis2011.

6. ГИС «Панорама». Комплекс подготовки документов аэронавигационной информации. URL: https://gisinfo.ru/products/anibasex64.htm.

7. Приложение 6 к Конвенции о международной гражданской авиации. Эксплуатация воздушных судов. Часть первая. URL: http://www.6pl.ru/asmap/Annexes/an06_p1_cons_ru.pdf.

8. Крячок С. Д. Топографо-геодезичне забезпечення аеропортів. *Технічні науки та технології*. 2018. № 1 (11). С. 239–251.

9. Службы аэронавигационной информации. Приложение 15 к Конвенции о международной гражданской авиации. Международная организация гражданской авиации. Издание четырнадцатое. Июль 2013 года. URL: http://www.vip-class.ru/userfiles/file/biblioteka/attach_15.pdf.

10. Terrain and Obstacle Data Manual. URL: http://www.eurocontrol.int/publications/terrain-and-obstacle-data-tod-manual.

11. Руководство по Всемирной геодезической системе – 1984 (WGS 84). URL: http://ggspb.org/normativnaya-baza/files/rukovodstvo-po-vsemirnoi-geodezicheskoi-sisteme-1984.pdf.

12. Войтенко С. П. Математична обробка геодезичних вимірів. Теорія похибок вимірів : навчальний посібник. Київ : КНУБА, 2003. 216 с.

13. Кучер О. В. Методичні основи впровадження Світової геодезичної системи WGS-84 для цілей цивільної авіації : автореф. дис. … канд. техн. наук : 05.24.01 – Геодезія / Київський національний ун-т будівництва і архітектури. Київ, 2006. 19 с.

References

1. Pro zatverdzhenya Derzhavnoyi tsilovoi prohramy rozvytku aeroportiv na period do 2023 roku [About the statement of the State target program of development of the airport for the period till 2023]. (February 24, 2016). http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show.

2. Pro zatverdzhennya Aviatsiynykh pravyl Ukrayiny "Obsluhovuvannya aeronavihatsiynoyu informatsiyeyu" [About the statement of Aviation rules of Ukraine "Service of the aeronautical information"]. (May 18, 2020). https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0760-19#Text.

3. Bokhanov, I. (May 7-12, 2013). Zastosuvannia heoinformatsiinykh system u aeronavihatsii [Application of geographic information systems in air navigation]. *Chernihivskyi naukovyi chasopys Chernihivskoho derzhavnoho instytutu ekonomiky i upravlinnia. Ser. 2: Tekhnika i pryroda – Chernihiv Scientific Journal of the Chernihiv State Institute of Economics and Management. Ser. 2: Technology and nature* (pp. 23–28). PJSC "Desna".

4. *GIS Karta 2005 – raschety po karte [GIS Map 2005 – map calculations].* (n.d.). KB Panorama. https://gisinfo.ru/item/31.htm.

5. *GIS «Karta 2011» [GIS Map].* (n.d.). Geoguide. http://www.geoguide.com.ua/software/software.php?part=panorama &art=.

6. *GIS «Panorama». Kompleks podgotovki dokumentov aeronavigatsionnoy informatsi [GIS "Panorama". Complex for preparing aeronautical information documents].* (n.d.). KB Panorama. https://gisinfo.ru/products/anibasex64.htm.

7. *Prilozheniye 6 k Konventsii o mezhrodnoy grazhdanskoy aviatsii. Ekspluatatsiia vozdushnykh sudov. Chast pervaia [Appendix 6 to the Convention on International Civil Aviation. Aircraft operation. Part one].* http://www.6pl.ru/asmap /Annexes/an06_p1_cons_ru.pdf.

8. Kriachok, S. D. (2018). Topografo-geodezichne zabezpechennya ayeroportív [Topographic and geodetic maintenance of airports]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohiyi – Technical sciences and technologies,* 1 (11), pp. 239–251.

9. *Aeronautical information services. Annex 15 to the Convention on International Civil Aviation. ICAO.* (July 2013). http://www.vip-class.ru/userfiles/file/biblioteka/attach_15.pdf.

10. Terrain and Obstacle Data Manual. EUROCONTROL. (October 2011). http://www.eurocontrol.int/publications/terrain-and-obstacle-data-tod-manual.

11. Guide to the World Geodetic System – 1984 (WGS 84). ICAO. (202). http://ggspb.org/normativnaya-baza/files/rukovodstvo-po-vsemirnoi-geodezicheskoi-sisteme-1984.pdf.

12. Voytenko, S. P. (2003). *Matematychna obrobka heodezychnykh vymiriv. Teoriia pokhybok vymiriv [Mathematical processing of geodetic measurements. Measurement error theory]*. KNUBA.

13. Kucher, O. V. (2006). *Metodychni osnovy vprovadzhennya Svitovoyi heodezychnoyi systemy WGS-84 dlya tsiley tsyvil'noyi aviatsiyi [Methodical bases of implementation of the World geodetic system WGS-84 for the purposes of civil aviation]* [abstract PhD dissertation, Kyiv National Academy of Civil Engineering and Architecture].

UDC 528.4;528.489

Serhiy Kryachok, Olena Boiko, Liudmyla Mamontova

CONSIDERATION OF ICAO REQUIREMENTS FOR TERRAIN AND OBSTACLES IN THE AIRPORT AREA FOR THEIR MAPPING AND USE IN GEOINFORMATION SYSTEMS

The urgency of the research. *Within the framework of the State Target Program for the Development of Airports for the Period up to 2023 in Ukraine in accordance with the order of the State Aviation Service of Ukraine No. 582 dated 13.05.2019, new aviation regulations were introduced regarding aeronautical information services. Aviation regulations have been developed taking into account European Union legislation, Eurocontrol documents, ICAO standards and recommended practices.*

Target setting. *Nowadays, specialized geographic information systems are being improved to operate with aeronautical information. They make it possible to increase the degree of automation of aeronautical data management in airport areas, to speed up the process of developing and issuing the necessary documents, to improve their quality and, as a result, to increase efficiency in decision-making and reduce the risk of emergencies.*

Actual scientific researches and issues analysis. *The latest publications in open access, devoted to the use of geographic information systems for handling aeronautical data were reviewed.*

An unexplored parts of a common problem. *Analysis of publications allows us to conclude that it is necessary to take into account the ICAO requirements when developing air navigation geoinformation systems. According to the order of the State Aviation Service of Ukraine No. 582, the list of aeronautical maps to be published includes an electronic map of the terrain and obstacles in the airport areas and filling the GIS databases with relevant data on the qualitative and quantitative characteristics of terrain and obstacles.*

The research objective. *The main purpose of the article is to analyze the regulatory documents of ICAO and Eurocontrol regarding the characteristics of the terrain and obstacles in the airport areas, which data is entered into the specialized GIS database.*

The statement of basic materials. *The division of the country's airspace into separate regions is considered: region 1 - the entire territory of the state: region 2 - the territory of the nodal control area, region 3 - the territory along the runway, territory 4 - the site at the end of the runway, equipped for precise approach for landing in category II or III. The requirements for quantitative characteristics and attributive information for terrain and obstacles in aeronautical data in accordance with the areas of the airport are given. The WGS-84 coordinate system according to version (G1150) and ITRF 2000 is used as a reference system for determining the latitudes and longitudes of obstacles or terrain objects in international air navigation, and mean sea level (MSL) is taken to determine the height. For the transition from geodetic heights to heights relative to mean sea level, the Earth gravity model EGM-96 is used, on which basis regional or local geoid models in the airport areas are developed and used, which refine the EGM-96 data.*

Conclusions. *The analysis of the regulatory documents of ICAO and Eurocontrol was carried out regarding the qualitative and quantitative requirements for data on the terrain and obstacles that make up the databases of specialized GIS, depending on the areas of the airport, for the choice of methods for their mapping. To determine the planned position of obstacles or terrain objects in international air navigation, the WGS-84 coordinate system according to version (G1150) and ITRF 2000 is used, and the height is measured by the mean sea level. For this, the Earth's gravity model EGM-96 is used, updated which at the local level.*

Keywords: *ICAO requirements; geographic information systems (GIS); terrain, obstacles in airport areas; databases; aeronautical information.*

Table: 2. Fig.: 3. References: 13.

Крячок Сергій Дмитрович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри геодезії, картографії та землеустрою, Національний університет «Чернігівська політехніка» (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).
Kryachok Serhiy – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of geodesy, cartography and land management, Chernihiv Polytechnic National University (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).
E-mail: geodesist2015@gmail.com
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-5633-1501
ResearcherID: N-3061-2016

Бойко Олена Леонідівна – старший викладач кафедри аерокосмічної геодезії та землеустрою, Національний авіаційний університет (просп. Любомира Гузара, 1, м. Київ, 03058, Україна).
Boiko Olena – Senior Lecturer at the Department of Aerospace Geodesy and Land Management, National Aviation University (1 Lubomir Husar Av., 03058 Kyiv, Ukraine).
E-mail: boyko_lena@ukr.net
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-8654-9392

Мамонтова Людмила Степанівна – старший викладач кафедри геодезії, картографії та землеустрою, Національний університет «Чернігівська політехніка» (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).
Mamontova Lyudmila – Senior Lecturer of the Department of geodesy, cartography and land management, Chernihiv Polytechnic National University (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).
E-mail: liudmila mamontova@yandex.Ua
ORCID: http: // orcid.org/0000-0003-4144-5261
ResearcherID: N-3070-2016

Крячок С., Бойко О., Мамонтова Л. Врахування вимог ІКАО стосовно місцевості та перешкод у районах аеропорту для їх картографування та використання в геоінформаційних системах. *Технічні науки та технології.* 2020. № 3 (21). С. 301-309.

УДК 528.3
DOI: 10.25140/2411-5363-2020-3(21)-310-318

Анатолій Віват, Юрій Кордуба, Сергій Петров

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕМПЕРАТУРИ НА ЗМІНУ РОЗМІРУ КОНТРОЛЬНИХ ЛІНІЙОК ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ІНДИКАТОРА ГОДИННИКОВОГО ТИПУ

Актуальність теми дослідження. *Вимірювання малих переміщень є важливим завданням інженерної геодезії. Виміри з похибкою діапазону 0,001–0,1 мм називають технічними. Для виконання таких вимірювань розробляють спеціальне обладнання та методики роботи на ньому. Контрольні лінійки та взірцеві міри використовують для метрологічної повірки обладнання. Найбільше на зміну розміру виробу впливає температура. Розробка методів для високоточної фіксації малих переміщень від зміни температури є актуальним завданням.*

Постановка проблеми. *Виміряти мале переміщення з високою точністю дуже складно. Для цього використовують інтерферометри. Запропонувати новий високоточний метод вимірювання малих переміщень. Дослідити можливість використання пропонованого методу для визначення лінійного розширення контрольних лінійок.*

Аналіз останніх досліджень і публікацій. *Розглянуто публікації у відкритому доступі щодо лінійного розширення матеріалу, приладів та методів фіксації малих переміщень.*

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. *Використання індикаторів годинникового типу замість інтерферометрів. Дослідження зміни розміру контрольних лінійок у разі зміни температури. Перевірка формул температурного лінійного розширення для конкретного досліджуваного взірця.*

Мета статті. *Дослідити зміну довжини контрольних лінійок від температури з використанням індикаторів годинникового типу.*

Виклад основного матеріалу. *Використання індикаторів годинникового типу дає змогу відслідковувати зміну розміру контрольних лінійок у разі зміни температури і, у свою чергу, дає можливість перевірки формули температурного лінійного розширення для конкретного досліджуваного взірця, а не тільки фіксувати розмір. Також нами встановлено, що швидка зміна температури, більше ніж на $1,5^0$ до десяти хвилин, викликає нелінійну зміну довжини досліджуваних взірців. Цей факт необхідно враховувати під час вимірювань контрольними лінійками в польових умовах при різких перепадах температури. Обчислені коефіцієнти кореляції зміни розміру від температури та зміни розміру в часі під впливом температури. Для контролю одержаних результатів було визначено зміну довжини контрольних лінійок з використанням лазерного інтерферометра. Зі зміною температури у 8.5^0 С контрольний метр змінив свій розмір на 0,18 та 0,16 мм (відповідно лазерний інтерферометр і індикатор годинникового типу).*

Висновки відповідно до статті. *Запропоновано методику визначення малих переміщень використовуючи індикатор годинникового типу. Встановлено коефіцієнти кореляції зміни величини в часі під впливом зміни температури. Уточнено коефіцієнти лінійного розширення для латуні та сталі. Практична цінність проведених досліджень у тому, що запропонована методика дозволяє проводити метрологічну перевірку (позачергову, біжучу) еталонів довжини без застосування класичних еталонів таких, як лазерні інтерферометри.*

Ключові слова: *еталони; високоточні вимірювання, контрольна лінійка; індикатор годинникового типу; зміна температури, зміна розміру.*

Рис.: 5. Табл.: 8. Бібл.: 12.

Актуальність теми дослідження. Від своєчасного та правильного вирішення питання метрологічного забезпечення геодезичних приладів значною мірою залежить якість виконання геодезичних робіт для різноманітних сфер господарства (геодезія, будівництво, землеустрій, військова справа та інше). Метрологічні перевірки приладів для виміру геометричних величин (довжин ліній) проводяться згідно з методикою на спеціалізованому обладнанні та відповідними організаціями, які акредитовані на право проведення таких робіт. Процедура метрологічної перевірки полягає в передачі розміру від одного до іншого засобу вимірювання (від вищого в ієрархії еталонної бази до нижчого) [1].

У цій ієрархічній базі досліджувані контрольні лінійки є штриховими зразковими мірами III та IV типу, які служать для передачі розміру від робочих еталонів до засобів вимірювальної техніки (нівелірні рейки, металеві лінійки, польові лінійні базиси). Відповідно до періодичності проведення метрологічних перевірок виділяють чергову, позачергову, біжучу перевірку. Чергову метрологічну перевірку проводять з періодичністю раз в 2 роки шляхом визначення її довжини з використанням лазерного інтерферометра.

Постановка проблеми. У випадку проведення позачергових чи біжучих перевірок контрольного метру недоцільно використання лазерних інтерферометрів (час проведення, вартість послуги та інше). Тому, на нашу думку, у таких випадках існує можливість визначати зміну його довжини з використанням індикатора годинникового типу.

© Віват А. Й., Кордуба Ю. Г., Петров С. Л., 2020

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Як було зазначено вище, контрольна лінійка та взірцеві міри застосовують для метрологічних перевірок різноманітних геодезичних приладів та спеціалізованого обладнання. Також у [2-4] одометрові та десятиметрові інтервали фазової ділянки базису другого розряду виміряли контрольним метром із похибкою менше 0,1 та 0,3 мм відповідно. Контрольні метри використовують для компарування нівелірних рейок [5]. Також у роботах [6; 7] показано необхідність прямих вимірювань та досліджено методики високоточних вимірювань в інженерній геодезії. У роботі [8] розроблено сферичний відбивач та відбивач-вектор для високоточних технічних вимірювань у промисловості, де є значна зміна температури. Розробка сучасними фірмами [9, 10] обладнання для прямих вимірювань типу «контрольний метр» підтверджує актуальність таких досліджень.

Виділяють лінійне α та об'ємне β розширення розмірів твердого тіла при зміні температури. Нами досліджено лінійне розширення. Значення лінійного коефіцієнта температурного розширення обчислюється формулою [11]

$$l = l_0(1+\alpha\cdot\Delta t), \tag{1}$$

де l_0, – розмір твердого тіла до нагрівання; l – розмір твердого тіла після нагрівання; Δt – різниця температури.

У табл. 1 наведено розрахунок зміни розмірів матеріалу від зміни температури, з якого виготовлюють робочі еталони довжин згідно коефіцієнтів лінійного розширення.

Таблиця 1

Зміна довжини одометрового відрізка від зміни температури.

Матеріал / Δl, мм	$\alpha\cdot$ 10^{-6} / ^0C	Зміна температури Δt, ^{0}C			
		1	5	10	20
Інвар	1,5	0,002	0,01	0,02	0,03
Латунь	19	0,02	0,10	0,19	0,38
Алюміній	23	0,02	0,12	0,23	0,46
Сталь	11	0,01	0,06	0,11	0,22

Графічно теоретично розраховану зміну довжини одометрового відрізка (Δl), виготовленого з того чи іншого матеріалу під впливом зміни температури (Δt), наведено на рис. 1.

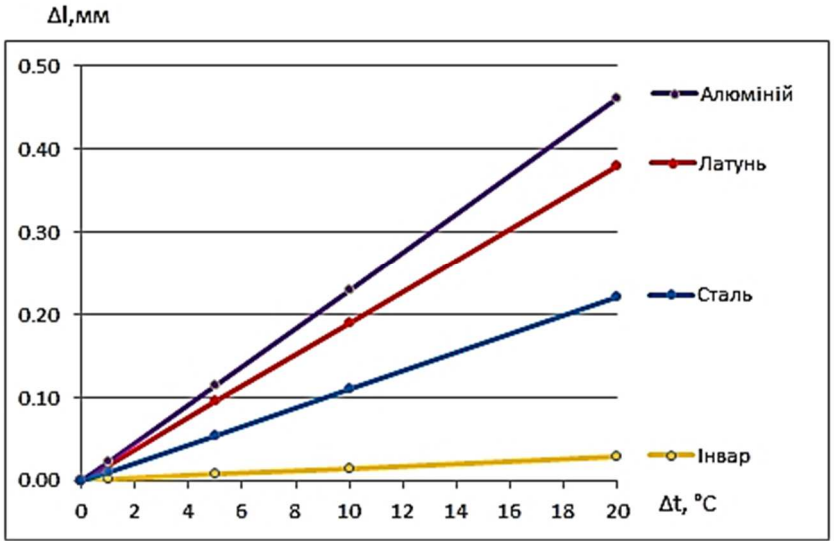


Рис. 1. Зміна довжини метрового відрізка від зміни температури

Оскільки контрольний метр виготовлено з латуні, то зміна температури на один градус теоретично повинна змінити його розмір приблизно на 0,02 мм. Тому для проведення метрологічних перевірок контрольних метрів як штрихових зразкових мір III та IV типу використовують лазерні інтерферометри. Необхідно зазначити, що лазерні інтерферометри як еталони довжини в Україні розташовані в Києві та Харкові. В інституті геодезії НУ «Львівська політехніка» встановлено лазерний інтерферометр ІП-1 з лінійною частиною довжиною 20 метрів. Середньо квадратична похибка визначення зміни довжини інтерферометром становить 1 мкм/1 м. Фіксацію відліку виконують за допомогою оптичного мікроскопу, який закріплено на каретці. Вона, у свою чергу, пересувається по напрямним, які забезпечують відхилення лазерного променю не більше ніж 1,5 мм на всій довжині лінійної частини.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. До недосліджених проблем, які планується нами вирішити, можна віднести дослідження лінійної зміни розміру контрольних лінійок при зміні температури, перевірка формул температурного лінійного розширення для конкретного досліджуваного взірця, а також дослідження точності при використанні індикаторів годинникового типу замість інтерферометрів.

Мета статті. Дослідити зміну довжини контрольних лінійок від температури з використанням індикатора годинникового типу (точність відлічування взяття відліку 0,01 мм).

Виклад основного матеріалу. Як досліджувані зразки вибрано контрольний метр та дві кінцеві міри (рис. 2), де *1* – півметрова кінцева міра III типу зі сталі, *2* – метрова кінцева міра III типу зі сталі *3* – метровий контрольний метр IV типу з латуні. Для підвищення точності визначення температури досліджуваних зразків використано додатковий повірений термометр із двома зовнішніми виносними давачами.



Рис. 2. Досліджувані зразки

Експериментальні дослідження проводили на розробленій нами установці (рис. 3), де один кінець контрольного метра жорстко закріпляли на металевому швелері лінійної частини лазерного інтерферометра ІП-1, а другий також жорстко, але через індикатор годинникового типу. Важливим є забезпечення стабільності контролюючого параметра для всіх елементів конструкції, крім досліджуваного. Це досягається тим, що лабораторія оснащена автономною системою опалення, яка забезпечує стабільну температуру в межах 15-20 °С. Перед початком проведення експерименту контрольні лінійки та кінцеві міри охолоджували для збільшення діапазону зміни температури. Під час вимірювань температура середовища було 18 °С, тобто близька до нормальної 20 °С. Для дослідження впливу температури на зміну розміру досліджуваних зразків нами виконано п’ять типових експериментів. У кожному з експериментів фіксували значення температури, відлік по індикатору годинникового типу та час відлічування. Експерименти 1–3 полягали в дослідженні зміни довжини контрольного метру з різним інтервалом часу. Експеримент № 4 полягав у дослідженні зміни довжини метрової кінцевої міри, а експеримент № 5 – у дослідженні зміни довжини півметрової кінцевої міри.



Рис. 3. Установка для досліджень

Результати п’ятьох експериментів подано в табл. 2–6,

де τ – часовий момент відліку індикатора годинникового типу;
t – температура досліджуваного зразка;
Δτ – різниця часу у відлічуванні індикатора годинникового типу;
Δt – різниця температури між відліками індикатора годинникового типу;
Δl – різниця розміру досліджуваного взірця.

Таблиця 2

Результати вимірювань (експеримент 1)

№	τ, год	t, °C	Δτ, год	Δt, °C	Δl, мм
1	13:30	11,0	0:00	0,0	0,00
2	13:55	14,5	0:25	3,5	0,09
3	15:00	17,0	1:30	6,0	0,13

Таблиця 3

Результати вимірювань (експеримент 2)

№	τ, год	t, °C	Δτ, год	Δt, °C	Δl, мм
1	12:32	7,5	0:00	0,0	0,00
2	12:41	11,5	0:09	4,0	0,07
3	12:48	13,0	0:16	5,5	0,15
4	12:56	15,0	0:24	7,5	0,18
5	13:14	16,5	0:42	9,0	0,18
6	17:00	17,5	4:28	10,0	0,19

Таблиця 4

Результати вимірювань (експеримент 3)

№	τ, год	t, °C	Δτ, год	Δt, °C	Δl, мм
1	13:37	9,5	0:00	0,0	0,0
2	13:41	10,5	0:04	1,0	0,02
3	13:46	12,0	0:09	2,5	0,05
4	13:50	13,0	0:13	3,5	0,08
5	13:53	14,0	0:16	4,5	0,09
6	14:00	15,0	0:23	5,5	0,11
7	14:05	16,0	0:28	6,5	0,12
8	14:18	17,0	0:41	7,5	0,14
9	14:42	17,5	1:05	8,0	0,16
10	16:27	18,0	2:50	8,5	0,16

Таблиця 5

Результати вимірювань (експеримент 4)

№	τ, год	t, °C	Δτ, год	Δt, °C	Δl, мм
1	9:22	8,3	0:00	0,0	0,00
2	9:27	10,3	0:05	2,0	0,02
3	9:29	11,3	0:07	3,0	0,03
4	9:31	12,3	0:09	4,0	0,04
5	9:35	13,3	0:13	5,0	0,05
6	9:39	14,3	0:17	6,0	0,05
7	9:44	15,3	0:22	7,0	0,06
8	9:52	16,5	0:30	8,2	0,07
9	9:59	17,3	0:37	9,0	0,08
10	10:35	19,3	1:13	11,0	0,10

Таблиця 6

Результати вимірювань (експеримент 5)

№	τ, год	t, °C	Δτ, год	Δt, °C	Δl, мм
1	15:18	4,7	0	0,0	0,00
2	15:19	5,7	0:01	1,0	0,00
3	15:21	7,7	0:03	3,0	0,01
4	15:22	8,7	0:04	4,0	0,01
5	15:26	11,7	0:08	7,0	0,02
6	15:28	12,7	0:10	8,0	0,02
7	15:33	14,7	0:15	10,0	0,03
8	15:44	17,7	0:26	13,0	0,04
9	15:51	18,7	0:33	14,0	0,04
10	16:35	20,8	1:17	16,0	0,05

На рис. 4 подано виміряні значення зміни довжини (*Δl*) залежно від зміни температури (Δt).

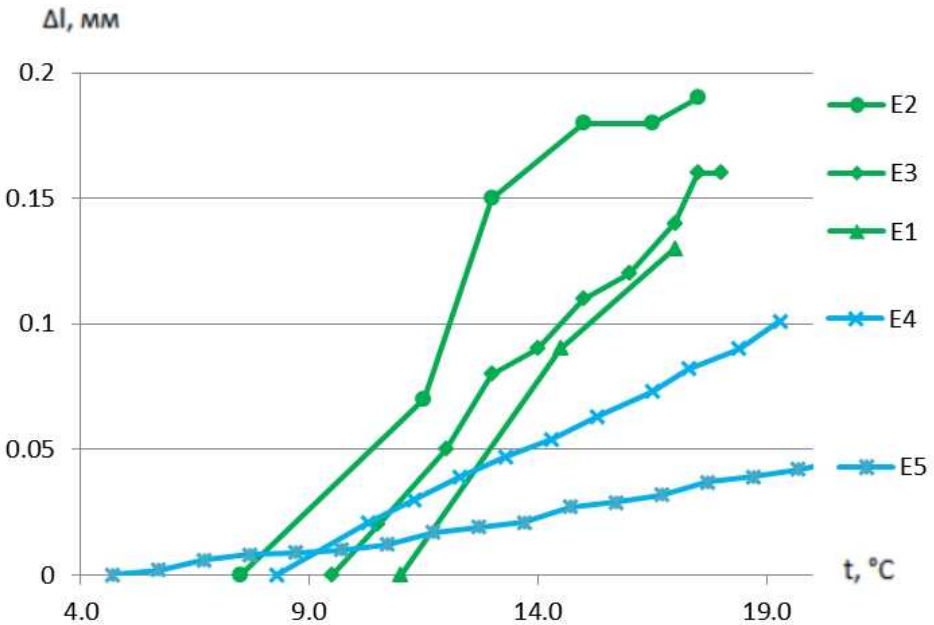


Рис. 4. Зміна розміру досліджуваного взірця від температури. (дані з колонок 3 та 6 таблиць2–6)

На рис. 5 наведено виміряні нами зміни довжин (Δl) залежно від зміни температури (Δt), приведені до нуля шкали. Також наведено теоретично розраховані за відомими коефіцієнтами лінійного розширення значення зміни довжин залежно від зміни температури.

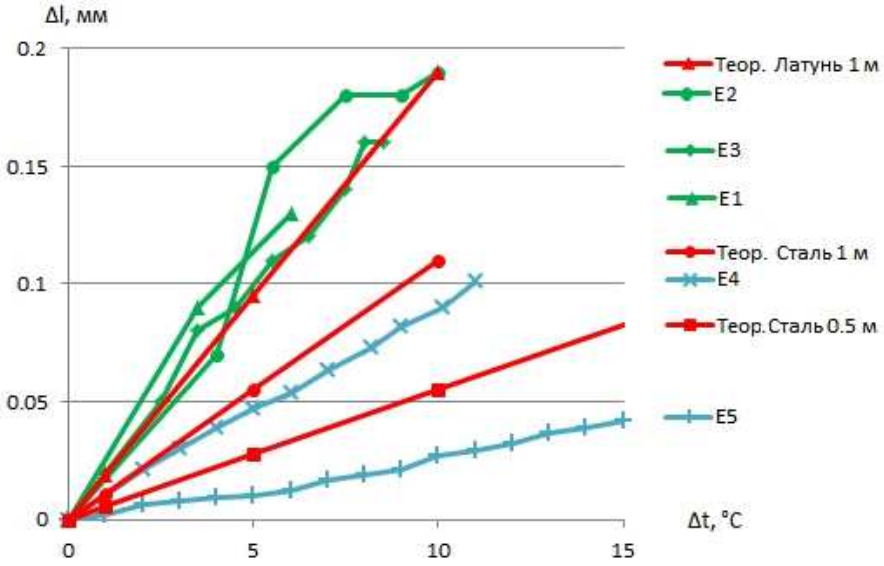


Рис. 5. Зміна розміру досліджуваного взірця від зміни температури (дані з колонок 5 та 6 таблиць2–6 приведені до нуля)

Експеримент 1 та 2, де як досліджуваний взірець був контрольний метр, виготовлений із латуні, показав нелінійне видовження при різкому зростанні температури ($1{,}5^0$ менше ніж за 10 хвилин). Експеримент 3 із невеликим відхиленням відповідає лінійній залежності видовження. Експеримент 4 та 5 відповідає лінійній залежності, але спостерігається невідповідність коефіцієнту розширення сталі. Нами розраховано коефіцієнти кореляції "r" для підтвердження нелінійної залежності видовження від зростання температури за формулою з [12]. Отримані значення наведені в табл. 7. Розрахунок коефіцієнтів кореляції для другого та третього досліду виконали без останніх вимірів, оскільки вони виконані із значною затримкою у часі для підтвердження стабілізації розміру при незмінній температурі.

Таблиця 7

Коефіцієнти кореляції зміни видовження (Δl) досліджуваного зразка від зміни температури (Δt)

№	r (Δt, °C - Δl,мм)
r_{E1}	1,00
r_{E2}	0,89
r_{E3}	0,99
r_{E4}	1,00
r_{E5}	1,00

Оскільки коефіцієнти кореляції експерименту 3–5 дорівнюють одиниці, то за даними таблиць 4–6 можна розрахувати коефіцієнт лінійного розширення для кожного досліджуваного взірця. Виразили з формули (1) коефіцієнт лінійного розширення "α" (2):

$$\alpha = \frac{l - l_0}{l_0 \cdot \Delta t}. \qquad (2)$$

У табл. 8 подано уточнені коефіцієнти лінійного розширення для контрольного метру, виготовленого з латуні, та взірцевої міри, виготовленої зі сталі.

Таблиця 8

Уточнені коефіцієнти лінійного розширення для досліджуваних взірців із латуні та сталі

Матеріал / Δl, мм	$\alpha \cdot 10^{-6} / {}^0C$	С.К.П. $\alpha \cdot 10^{-6} / {}^0C$
Латунь	20,00	1,30
Сталь	9,46	0,99

Для контролю одержаних результатів було визначено зміну довжин досліджуваних взірців з використанням лазерного інтерферометра. Одержані результати, а саме зміна довжини визначена лазерним інтерферометром і індикатором годинникового типу відрізняються на 0,02 – 0,04 мм, що підтверджує можливість використання індикаторів годинного типу для проведення перевірок контрольних лінійок.

Висновки відповідно до статті. Аналізуючи результати досліджень, можна зробити такі висновки. Використання індикаторів годинникового типу дає змогу відслідковувати зміну розміру контрольних лінійок у разі зміни температури і, у свою чергу, дає можливість перевірки формули температурного лінійного розширення для конкретного досліджуваного взірця, а не тільки фіксувати розмір. Також нами встановлено, що швидка зміна температури, більше ніж на $1{,}5^0$ до десяти хвилин, викликає нелінійну зміну довжини досліджуваних взірців. Цей факт необхідно враховувати під час вимірювань контрольним метром в польових умовах при різких перепадах температури. Простота методики та доступність приладів для перевірки дає змогу проведення таких робіт не тільки у спеціалізованих лабораторіях, але й на виробництві та в закладах освіти для навчальних цілей.

Список використаних джерел

1. Про метрологію та метрологічну діяльність : Закон України від 05.06.2014 № 1314-VII. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1314-18.

2. Літинський В., Колгунов В., Муха В., Гарасимчук І. Використання Бережанського лінійного базису для дослідження світловіддалемірів. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва* : зб. наук. праць. Львів : Ліга-Прес, 2003. С. 175–177.

3. Літинський В., Віват А., Перій С., Літинський С. Спосіб вимірювання Взірцевого базиса 2-го розряду для еталонування електронних тахеометрів. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*. 2015. Вип. 81. С. 59–65.

4. Визначення інтервалів еталонного Бережанського базиса методом фотофіксації / С. Перій та ін. *Науковий вісник Ужгородського університету*. 2014. Вип. 3. С. 93-95.

5. Методика визначення інтервалів нівелірних рейок електронним тахеометром / В. Літинський та ін. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. Львів, 2014. С. 34–37.

6. Баран П. І. Інженерна геодезія. Київ : ПАТ «ВІПОЛ», 2012. 618 с.

7. Боровий В., Бурачек В. Високоточні інженерно-геодезичні вимірювання. Вінниця : ТОВ «Нілан-ЛТД», 2017. 236 с.

8. Vivat A., Tserklevych A., Smirnova O. A study of devices used for geometric parameter measurement of engineering building construction. *Geodesy, Cartography and Aerial Photography: inter-institutional scientific & technical collection*. 2018. Vol. 87. Pp. 21-29.

9. Tesa. Tesatechnology. *Tesa.* URL: ttps://tesatechnology.com/en-gb/home/.

10. Microtech. URL: https://microtech-ua.com/index.php?id_manufacturer=1&controller=manufacturer&id lang=3.

11. Дущенко В. П., Кучерук І. М. Молекулярна фізика і термодинаміка. Київ : Вища школа, 1993. 433 с.

12. Зазуляк П. М., Гавриш В. І., Євсєєва Е. М., Йосипчук М. Д. Основи математичного опрацювання геодезичних вимірювань. Львів : Растр-7, 2007. 408 с.

References

1. Pro metrolohiiu ta metrolohichnu diialnist [On Metrology and Metrological Activity], Law № 1314-VII (June 5, 2014) (Ukraine). https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1314-18.

2. Litynskyi, V., Kolhunov, V., Mukha, V., Harasymchuk, I. (2003). Vykorystannia Berezhanskoho liniinoho bazysu dlia doslidzhennia svitloviddalemiriv [The use of Berezhany linear basis for the study of light rangefinders]. In *Suchasni dosiahnennia heodezychnoi nauky ta vyrobnytstva – Modern achievements of geodetic science and production: collection of Scientific articles* (pp. 175–177). Liga-Press.

3. Litynskyi, V., Vivat, A., Perii, S., Litynskyi, S. (2015). Sposib vymiriuvannia Vzirtsevoho bazysa 2-ho rozriadu dlia etalonuvannia elektronnykh takheometriv [Method of measuring the Model basis of the 2nd category for calibration of electronic total stations]. *Heodeziia, kartohrafiia i aerofotoznimannia – Geodesy, cartography and aerial photography*, 81, pp. 59-65.

4. Periy, S. et al. (2014). Vyznachennia intervaliv etalonnoho Berezhanskoho bazysa metodom fotofiksatsii [Determination of intervals of the reference Brzezany basis by the method of photofixation]. *Naukovyi visnyk Uzhhorodskoho universytetu Uzhhorod – Scientific Bulletin of Uzhhorod University*, 3, pp. 93-95.

5. Litynskyi, V., Vivat, A., Pokotylo, I., Litynskyi, S., Herasymenko, Ye. (2014). Metodyka vyznachennia intervaliv nivelirnykh reiok elektronnym takheometrom [Methods for determining the intervals of leveling rails with an electronic total station]. *Suchasni dosiahnennia heodezychnoi nauky ta vyrobnytstva – Modern achievements of geodetic science and production* (pp. 34-37).

6. Baran, P. I. (2012). *Inzhenerna heodeziia [Engineering Geodesy].* PAT «VIPOL».

7. Borovy, V., Burachek, V. (2017). *Vysokotochni inzhenerno-heodezychni vymiriuvannia [High-precision engineering and geodetic measurements].* Nilan Ltd.

8. Vivat, A., Tserklevych, A., Smirnova, O. (2018). A study of devices used for geometric parameter measurement of engineering building construction. *Geodesy, Cartography and Aerial Photography: inter-institutional scientific & technical collection*, 87, pp. 21-29.

9. Tesa. *Tesatechnology*. https://tesatechnology.com/en-gb/home/.

10. Microtech. https://microtech-ua.com/index.php?id_manufacturer=1&controller=manufacturer&id_lang=3.

11. Dushchenko, V. P., Kucheruk, I. M. (1993). *Molekuliarna fizyka i termodynamika [Molecular physics and thermodynamics].* Vyshcha shkola.

12. Zazulyak, P. M., Gavrish, V. I., Evseeva, E. M., Yosypchuk, M. D. (2007). *Osnovy matematychnoho opratsiuvannia heodezychnykh vymiriuvan [Fundamentals of mathematical processing of geodetic measurements].* Raster-7.

UDC 528.3

Anatolii Vivat, Yurii Korduba, Sergii Petrov

INVESTIGATION OF TEMPERATURE INFLUENCE ON THE CONTROL METER SIZE CHANGE USING THE CLOCK TYPE INDICATOR

Urgency of the research. *Measuring small displacements is an important task of engineering geodesy. Measurements with an error in the range 0.001 mm - 0.1 mm are called technical measurements. Special equipment and methods of working on it are developed to perform such measurements. Control lines and sample measures are used for metrological verification of equipment. The temperature has the greatest effect on the change in the size of the equipment. The development of methods for high-precision fixation of small displacements from temperature changes is an urgent task.*

Target setting. *It is difficult to measure small displacement with high accuracy. Interferometers are used for this purpose. A new high-precision method for measuring small displacements is proposed. Investigate the possibility of using the proposed method to determine the linear extension of the control lines.*

Actual scientific researches and issues analysis. *Open access publications on linear expansion of material, devices and methods of fixing small movements are considered.*

Uninvestigated parts of general matters defining. *Use of clock-type indicators instead of interferometers. Research of change of the size of control lines at temperature change. Checking the formulas of thermal linear expansion for a specific test sample.*

The research objective. *Investigate the change in length of control lines from temperature using clock-type indicators.*

The statement of basic materials. *The use of clock-type indicators allows to track the change in the size of the control lines when the temperature changes, and in turn allows to check the formula of thermal linear expansion for a particular sample, and not just to fix the size. We also found that a rapid change in temperature, more than 1.50 to ten minutes, causes a*

nonlinear change in the length of the studied samples. This fact must be taken into account when measuring with control lines in the field at sharp temperature drops. The correlation coefficients of size change from temperature and size change over time under the influence of temperature are calculated. To control the obtained results, the change in the length of the control lines was determined using a laser interferometer. With a temperature change of 8.50 C, the control meter changed its size by 0.18 mm and 0.16 mm (respectively, laser interferometer and clock-type indicator).

Conclusions. *A method for determining small displacements using a clock-type indicator is proposed. The correlation coefficients of the change in time under the influence of temperature change are established. The coefficients of linear expansion for brass and steel are specified. The practical value of the research is that the proposed method allows for metrological verification (extraordinary, running) of standards of length without the use of classical standards such as laser interferometers.*

Keywords: *standards; high-precision measurements; control line; clock type indicator; temperature change, size change. Fig.: 5. Table: 8. References: 12.*

Віват Анатолій Йосипович – ст. викладач кафедри інженерної геодезії, Національний університет «Львівська політехніка» (вул. С. Бандери, 12, м. Львів, 79013, Україна).
Vivat Anatolii – Senior Lecturer of Department of Engineering Geodesy, Lviv Polytechnic National University (12 S. Bandery Str., 79013 Lviv, Ukraine).
E-mail: anatolii.y.vivat@lpnu.ua
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6114-5911

Кордуба Юрій Геннадійович – ст. викладач кафедри інженерної геодезії, Національний університет «Львівська політехніка» (вул. С. Бандери, 12, м. Львів, 79013, Україна).
Korduba Yurii – Senior Lecturer of Department of Engineering Geodesy, Lviv Polytechnic National University (12 S. Bandery Str., 79013 Lviv, Ukraine).
E-mail: yurii.h.korduba@lpnu.ua
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6516-1081

Петров Сергій Леонідович – доцент кафедри інженерної геодезії, Національний університет «Львівська політехніка» (вул. С. Бандери, 12, м. Львів, 79013, Україна).
Petrov Sergii – Associate Professor of Department of Engineering Geodesy, Lviv Polytechnic National University (12 S. Bandery Str., 79013 Lviv, Ukraine).
E-mail: petrovSL06@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1045-8125

Віват А., Кордуба Ю., Петров С. Дослідження впливу температури на зміну розміру контрольних лінійок із використанням індикатора годинникового типу. *Технічні науки та технології.* 2020. № 3 (21). С. 310-318.

ОСНОВНІ ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ ТА ПОДАЧІ РУКОПИСІВ НАУКОВИХ СТАТЕЙ ДО НАУКОВОГО ЖУРНАЛУ «ТЕХНІЧНІ НАУКИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ»

Шановні дописувачі!

Для подання статті необхідно спочатку надіслати на електронну адресу tst.technical.sj@gmail.com Вашу статтю, рецензію та довідку про автора (ів) для попереднього розгляду редакційною колегією журналу «Технічні науки та технології».

Після отримання позитивного відгуку прохання сплатити вартість публікації і відправити весь пакет документів.

Для публікації статті у журналі «Технічні науки та технології» необхідно в обов'язковому порядку подати:

– електронний варіант статті, оформленої за зразком;
– рецензію на статтю за підписом доктора наук;
– довідку про авторів;
– квитанцію (скановану) про сплату вартості публікації наукової статті.

Опублікування наукових статей у журналі «Технічні науки та технології» є платним. Вартість публікації 1 сторінки наукової статті становить **55 грн** (прохання обов'язково уточнювати вартість публікації). Оплата підтверджується квитанцією.

УМОВИ ПУБЛІКАЦІЇ, ВИМОГИ ЩОДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ, РЕКВІЗИТИ ОПЛАТИ ТА ОСТАННІ НОМЕРИ НАУКОВОГО ЖУРНАЛУ «ТЕХНІЧНІ НАУКИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ» РОЗМІЩЕНО НА САЙТІ НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ «ЧЕРНІГІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»:
http://tst.stu.cn.ua/

Контактна інформація.

Матеріали необхідно надсилати на адресу: 14035, м. Чернігів, вул. Шевченка, 95, корп. 1, к. 242 (науково-дослідна частина).

Контактна особа: Кормило Ірина Миколаївна.

Тел. роб.: (0462) 66-51-15

Тел. моб.: (093) 592-78-12

E-mail: tst.technical.sj@gmail.com

Відповідальність за матеріали, наведені у статті, несе автор. Неправильно оформлені автором стаття та супровідні документи, що не відповідають зазначеним вимогам, розглядатися не будуть.

Редакція розглядає надходження публікації та супровідних документів (рецензії, довідки про авторів тощо) як згоду дописувача (ів) щодо передачі авторського права на використання твору (тиражування, розповсюдження тощо).

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

ТЕХНІЧНІ НАУКИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

№ 3(21)

Відповідальний за випуск	С. П. Сапон
Редактор	О. С. Смєлова
Комп’ютерне складання та верстання	Т. М. Колот

Підписано до друку 30.09.2020. Формат 60×84/8. Ум. друк. арк. – 37,2.
Тираж 100 пр. Замовлення № 530/20.

Редакційно-видавничий відділ Національного університету «Чернігівська політехніка»
14035, Україна, м. Чернігів, вул. Шевченка, 95.
Свідоцтво про внесення суб’єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів
видавничої продукції серія ДК № 7128 від 18.08.2020 р.