

АНОТАЦІЯ

Наукова робота складається із вступу, 2 розділів і висновків. Загальний обсяг роботи становить 42 сторінок, список літератури з 19 найменувань на 2 сторінках.

Актуальність теми зумовлена потребою у підвищенні енергонезалежності авіаційних підприємств шляхом впровадження розосередженої генерації на основі відновлюваних джерел енергії. Запропонований вітровий електротехнічний комплекс, що враховує особливості експлуатації в умовах змінного вітрового навантаження. З огляду на сучасні виклики у сфері енергозабезпечення, екологічної безпеки та розвитку малої енергетики, представлена система автоматичного керування, реалізована на мікропроцесорній платформі, є перспективним напрямом підвищення надійності та ефективності електропостачання стратегічно важливих об'єктів, зокрема авіаційної інфраструктури.

Мета дослідження. Підвищення ефективності та надійності системи електропостачання авіаційних об'єктів шляхом розробки мікропроцесорної системи автоматичного керування вітроенергетичною установкою з урахуванням параметрів енергоспоживання, що дозволить мінімізувати ризик аварійних ситуацій та уникнути неефективних режимів роботи.

Об'єкт дослідження – процес керування електрогенерувальними системами вітроенергетичних установок.

Предмет дослідження – математичні моделі електропривода, вітроенергетичних установок і системи електропостачання авіаційних підприємств.

Сфери застосування: енергозабезпечення об'єктів авіаційної інфраструктури, розосереджена генерація в умовах критичної інфраструктури, автоматизовані системи керування електроенергетичними установками, мікропроцесорні системи керування в енергетиці.

Ключові слова: ВІТРОЕНЕРГЕТИКА, МІКРОПРОЦЕСОР, АВТОМАТИЧНЕ КЕРУВАННЯ, РОЗОСЕРЕДЖЕНА ГЕНЕРАЦІЯ, ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
1 ЗАГАЛЬНА ІНФОРМАЦІЯ ЩОДО РОЗОСЕРЕДЖЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ ТА ЇЇ ВПРОВАДЖЕННЯ В УМОВАХ АВІАЦІЙНИХ ПІДПРИЄМСТВ.....	6
1.1 Системи електропостачання авіаційних підприємств.....	6
1.2 Місце електропостачання авіаційних підприємств у контексті авіаційної безпеки та безпеки польотів.....	8
1.3 Аналіз досліджень з оцінки впровадження розосереджених джерел електричної енергії в Україні та світі.....	9
2 ВІТРОВИЙ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИЙ КОМПЛЕКС З ВЕРТИКАЛЬНОЮ ВІССЮ ОБЕРТАННЯ ВІТРОВОГО КОЛЕСА.....	14
2.1 Методика розрахунку конструкції безредукторного електромеханічного перетворювача енергії вітру в електричну.....	14
2.2 Постановка задачі мікропроцесорної реалізації системи автоматичного керування вітровим електротехнічним комплексом з вертикальною віссю обертання вітрового колеса.....	20
2.3 Вибір сенсорів інформативних параметрів регулятора ВЕК.....	20
2.4 Мікропроцесорна реалізація системи автоматичного керування вітровим електротехнічним комплексом.....	23
2.5 Комп'ютерне моделювання якості роботи системи керування і дослідження її на стійкість.....	26
ВИСНОВКИ.....	40
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	41

ВСТУП

Забезпечення надійного та ефективного електропостачання є ключовою умовою стабільного функціонування авіаційних підприємств. Ураховуючи високі вимоги до безпеки польотів, безперервність роботи критичного обладнання та зростаючі обсяги енергоспоживання, традиційні централізовані системи енергопостачання часто виявляються недостатньо гнучкими й вразливими до аварій. У цьому контексті особливої актуальності набуває впровадження розосереджених джерел енергії, зокрема вітроенергетичних установок, здатних забезпечити додаткове або резервне живлення.

Розробка інтелектуальних систем керування для таких установок дозволяє не лише підвищити ефективність перетворення енергії вітру, а й адаптувати роботу генераторів до реальних умов споживання. Використання мікропроцесорних технологій у поєднанні з алгоритмами чіткого та нечіткого регулювання відкриває нові можливості для створення енергоефективних, надійних та автономних електропостачальних систем.

Таким чином, обрана тема є своєчасною та доцільною в умовах модернізації енергетичної інфраструктури авіаційної галузі та розвитку малої розосередженої енергетики.

Метою дослідження є підвищення ефективності та надійності системи електропостачання авіаційних об'єктів шляхом розробки мікропроцесорної системи автоматичного керування вітроенергетичною установкою з урахуванням параметрів енергоспоживання, що дозволить мінімізувати ризик аварійних ситуацій та уникнути неефективних режимів роботи..

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі завдання:

- Провести аналіз літературних джерел щодо існуючих підходів до керування вітроенергетичними установками та системами розосередженого енергопостачання.
- Визначити ключові параметри систем електропостачання, що впливають на їх надійність, стабільність і енергоефективність.
- Запропонувати конструкцію електромеханічного комплексу

вітроенергетичної установки та систему автоматичного керування на мікропроцесорній основі.

- Виконати комп'ютерне моделювання роботи запропонованої системи в різних експлуатаційних режимах.

Основні наукові та практичні результати та їх значення:

- Отримав подальший розвиток підхід до побудови систем автоматизованого керування, який, на відміну від відомих рішень, дозволяє застосовувати закони керування до вітроенергетичних комплексів, що забезпечує підвищення ефективності їх функціонування.

- Розроблено комп'ютерну модель системи керування вітроенергетичним комплексом, яка, на відміну від аналогів, враховує розподілену генерацію, що дає змогу підвищити ефективність процесу проєктування таких систем.

- Розроблено алгоритм роботи електромеханічного комплексу вітроенергетичної установки з урахуванням змінних вхідних параметрів, що забезпечує адаптивність і стабільність роботи системи за різних режимів навантаження.

1 ЗАГАЛЬНА ІНФОРМАЦІЯ ЩОДО РОЗОСЕРЕДЖЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ ТА ЇЇ ВПРОВАДЖЕННЯ В УМОВАХ АВІАЦІЙНИХ ПІДПРИЄМСТВ

1.1 Системи електропостачання авіаційних підприємств

Аеродроми є дуже важливою складовою авіаційної системи. Від того, наскільки грамотно побудовано їхню роботу, залежить транспортна доступність регіонів, ефективність функціонування авіакомпаній.

Експлуатація аеродрому, як структури, спрямована насамперед на забезпечення безпеки та регулярності польотів та досягнення фінансових ао військових цілей. Досягнення цих задач залежить від злагодженості взаємодії різних служб аеропорту та технічної готовності його інфраструктури.

Інфраструктура аеропорту є комплексом структурних одиниць, різних за своїм призначенням і функцій. Так, комплекси електрорадіотехнічного та електросвітлотехнічного обладнання призначені для управління рухом повітряних суден у районі аеродрому та забезпечення зльоту та посадки в умовах обмеженої видимості. Парк машин та механізмів аеродромної служби дозволяє утримувати територію аеродрому у стані, що відповідає вимогам нормативних документів.

Тільки комплексний підхід та розуміння технічних та технологічних особливостей функціонування окремих частин аеропорту при управлінні підприємством дозволяють досягти високого рівня безпеки та регулярності польотів.

Аеропорт є важливою частиною авіатранспортної системи, оскільки у ньому здійснюється перехід повітряного транспорту з режиму повітряного функціонування режим наземного. Саме тут відбувається взаємодія трьох основних складових цієї системи – самого аеропорту, авіакомпаній та користувачів.

Планування функціонування аеропорту має враховувати взаємодію цих елементів системи. З погляду хорошої роботи системи, кожен із її елементів повинен досягти деякої рівноваги з рештою двох елементів. Відсутність

рівноваги створює неоптимальні умови для роботи аеропорту, що характеризуються такими факторами [13]:

- неповне функціонування аеропорту;
- неповне функціонування авіакомпаній в аеропорту;
- незадовільні умови роботи для співробітників авіакомпаній та аеропорту;
- неадекватні умови для пасажирів;
- недостатність забезпечення польотів;
- висока вартість перевезень для користувача;
- неадекватне постачання авіакомпаній обладнанням;
- велика кількість затримок для авіакомпаній та пасажирів;
- низький рівень обслуговування пасажирів.

Аеропорт є початковим, проміжним чи кінцевим функціональним пунктом авіарейсу. Основні функції аеропорту – забезпечення зльоту та посадки ПС, вивантаження чи навантаження комерційного вантажу, зміни екіпажу, необхідного обслуговування пасажирів.

Окрім цього, аеропорт повинен здійснювати виконання таких функцій:

- обслуговування, експлуатація, технічні роботи на ПС;
- функціонування авіакомпаній, включаючи екіпаж, бортпровідників, наземнотехнічний персонал;
- забезпечення польотів;
- контроль (державний чи урядовий – митний, санітарно-карантинний та ін.);
- ділова активність, необхідна для економічної стабільності аеропорту.

1.2 Місце електропостачання авіаційних підприємств у контексті авіаційної безпеки та безпеки польотів

Повітряний транспорт на сьогоднішній день є найбезпечнішим видом транспорту. За даними США регулярні повітряні перевезення у 750 разів безпечніші за автомобільні та у 30-35 разів – залізничні. Імовірність авіаційної події становить 1:67 000. Проте, наслідки авіаційних подій мають важкий характер.

Сучасна концепція літакобудування передбачає створення широкофюзеляжних ПС місткістю понад 300 пасажирів. Наприклад, пасажиромісткість літака Airbus A380 становить 525 осіб у салоні трьох класів або 853 особи в однокласовій конфігурації. Тобто кількість жертв авіаційної катастрофи може значно перевищувати аналогічні показники для автомобільного або залізничного транспорту, хоча ймовірність катастрофи значно нижча. У світлі вищевикладеного величезне значення для авіатранспортної системи набуває безпека польотів.

Безпека польотів (БП) – стан, у якому ризики, пов'язані з авіаційної діяльністю, що стосується експлуатації ЗС чи безпосередньо забезпечує таку експлуатацію, знижено до прийнятного рівня і контролюються.

Сьогодні відбулася еволюція поняття БП: спочатку БП розглядалася як властивість авіатранспортної системи здійснювати повітряні перевезення без загрози життю і здоров'я людей. Основними критеріями оцінки були поняття «критичного літака» та «критичної зони».

Властивість – це якість, ознака, що становить особливість чогось. Стан – це перебування до будь-якому положенні, якість стійке значення змінних параметрів об'єкта. Тобто, згодом відбувся перехід від якісної оцінки БП до кількісної, що потребує системного підходу, і на сьогоднішній день ми перебуваємо на етапі активного впровадження Системи управління безпекою польотів (СУБП).

Забезпечення БП є основним завданням для організації аеродромної діяльності. Служби аеродрому несуть відповідальність за технічне супроводження найскладніших етапів польоту – зльоту та посадки. Саме на цих етапах, згідно зі статистикою, ймовірність авіаційної події є найвищою.

Крім перерахованого вище обладнання, для забезпечення УВС у районі аеродрому використовується додаткове обладнання. До такого обладнання відносяться:

Окрема приводна радіостанція (ОПРС). ОПРС призначена для приводу на аеродром, виконання посадкового маневру та заходу на посадку ПС. Вона встановлюється на продовженні осі ЗПС, на відстані 10 км від її порога.

Тільки безперебійна робота всього комплексу радіолокаційного та радіонавігаційного обладнання дозволяє забезпечувати належний рівень БП при маневруванні ЗС у районі аеродрому та скоєнні зльотів та посадок. Це потребує наявності дублюючих систем, а також додаткових джерел електроживлення для обладнання.

1.3 Аналіз досліджень з оцінки впровадження розосереджених джерел електричної енергії в Україні та світі

Сьогодні впровадження розподіленої генерації (ДРГ) набуває особливої актуальності у зв'язку з тим, що такі установки використовують природний газ або відновлювані джерела енергії (ВДЕ) та мають підвищений коефіцієнт корисної дії [3-7]. Це зумовлює стрімкий розвиток малої енергетики, що базується на розміщенні генераторів невеликої потужності у складі сучасних систем енергозабезпечення споживачів.

З огляду на переваги ДРГ у порівнянні з традиційними електростанціями (гнучкість, локальність, екологічність) прогнозується подальше її впровадження, зокрема й в Україні, де ці чинники набувають особливого значення в умовах трансформації енергосистеми [8].

У міжнародній практиці «мала енергетична установка» визначається як установка потужністю не більше 80 МВт, що працює на біомасі, вторинних або

поновлюваних ресурсах: вітрі, сонячній та водній енергії [8]. До таких джерел енергії також належать установки, які використовують ресурси річок, водосховищ, промислових та побутових відходів, а також стислий природний газ. Часто ці джерела класифікують як «холодна» або «зелена» енергетика. У сучасних підходах їх включають до складу розподіленої генерації [3-7].

Поєднання високої ефективності ДРГ із використанням чистіших видів палива сприяє зниженню навантаження на навколишнє середовище, яке створюють централізовані енергетичні системи.

Згідно з дослідженнями Rocky Mountain Institute (США), розміщення малих генераторів ближче до споживачів, а також їхнє точне узгодження з реальними потребами має значні переваги над великими електростанціями, що значно підвищує ефективність усієї енергосистеми [3-7].

Енергетичні аналітики зазначають, що за відсутності ініціативи з боку традиційних енергетичних компаній, розвиток ДРГ здійснюватиметься самими споживачами за підтримки інвесторів. Надалі темпи зростання малої енергетики залежатимуть від реформ у структурі галузі, а також від процесу виведення з експлуатації атомних і вугільних електростанцій унаслідок посилення екологічних вимог [11].

В Україні додатковим стимулом для інвесторів стала нова модель ринку електроенергії, яка почала діяти з 1 липня 2019 року згідно із законом «Про ринок електричної енергії». Вона базується на принципах конкуренції та ринкового ціноутворення, що має забезпечити прозорість вартості електроенергії та підтримку розвитку відновлюваної генерації [3-7]. Вітропарки невеликої потужності, що побудовані 15-20 років тому і складаються з вітроелектричних установок одиничною потужністю від 100 до 250 кВт, виконувалися на робочих генераторних напругах. На рисунках 1.1, 1.2, 1.3 наведені варіанти радіальних схем вітропарків на базі вітроелектричних установок з різними типами електрогенераторів [3-7].

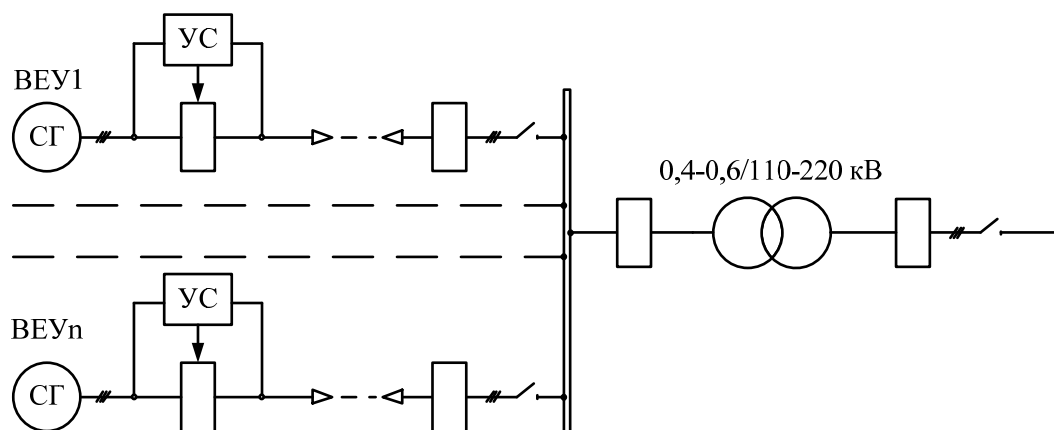


Рисунок 1.1 – Вітропарки невеликої потужності на базі вітроелектричних установок з синхронними генераторами

Застосування асинхронних генераторів у складі вітропарків дозволяє спростити електричну схему, зокрема за рахунок усунення необхідності у синхронізуючих пристроях. Компенсуючі пристрої при цьому можуть бути встановлені безпосередньо біля кожного генератора, окремо для груп генераторів або ж на підвищувальній підстанції другого ступеня [3-4].

У разі, якщо вітроелектричні установки мають змінну частоту обертання вітротурбіни та оснащуються асинхронними генераторами з короткозамкненим ротором або синхронними генераторами (з електромагнітним або магнітоелектричним збудженням), передача всієї виробленої електроенергії до мережі здійснюється за допомогою статичного перетворювача частоти [4].

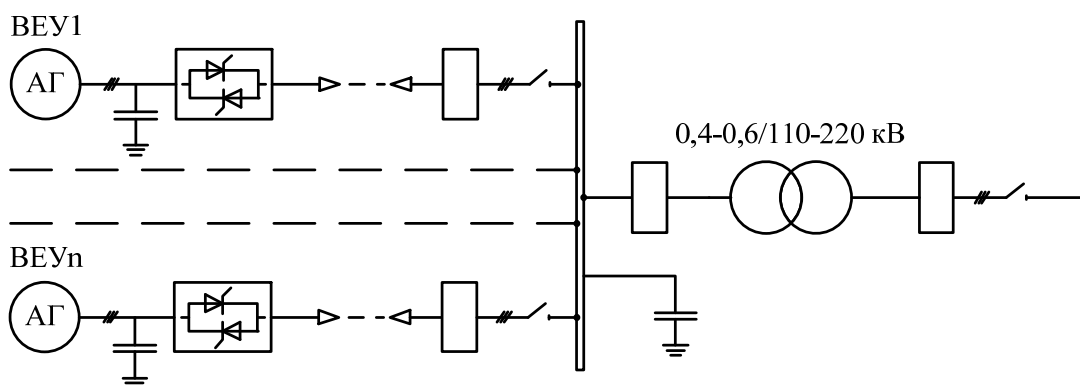


Рисунок 1.2 – Вітропарк невеликої потужності на базі вітроелектричних установок з асинхронними генераторами з короткозамкненим ротором

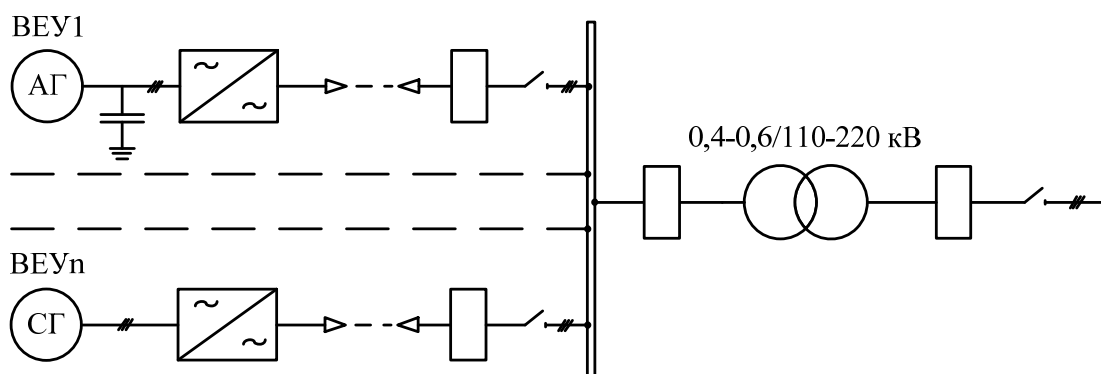


Рисунок 1.3 – Вітропарки невеликої потужності на базі вітроелектричних установок з асинхронними або синхронними генераторами непостійної частоти обертання і повним перетворенням виробленої потужності

На рис. 1.4-1.7 представлені схеми вітропарків, побудованих за радіальним принципом із використанням трансформаторів середньої напруги у складі вітроелектричних установок [4, 14].

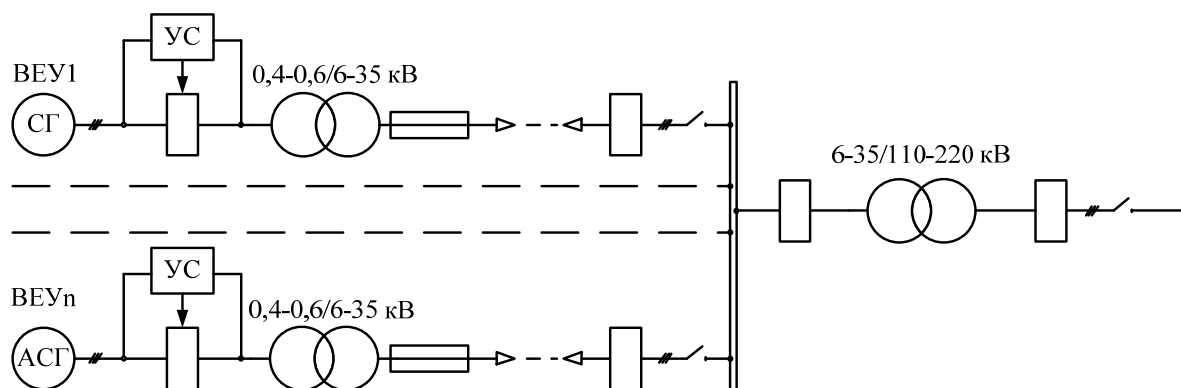


Рисунок 1.4 – Радіальна схема з'єднань вітропарків на базі вітроелектричних установок з синхронними генераторами

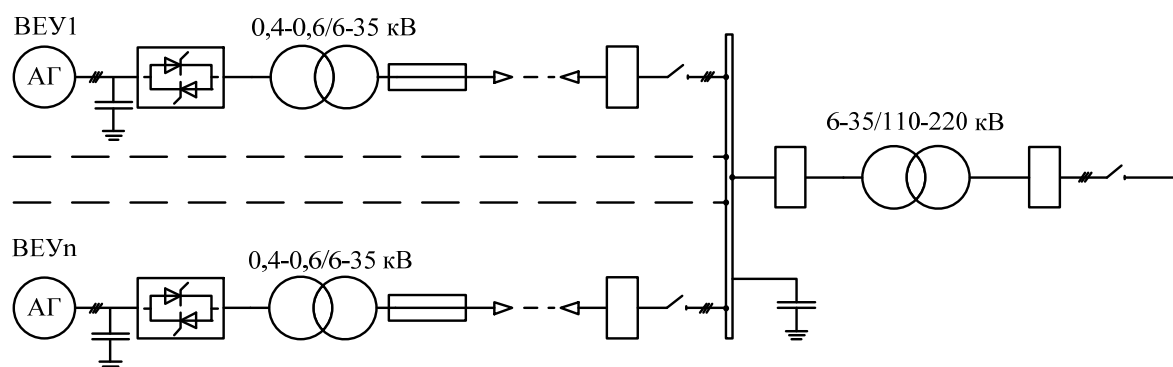


Рисунок 1.5 – Радіальна схема з'єднань вітропарків на базі вітроелектричної установки з асинхронними генераторами з короткозамкненим ротором

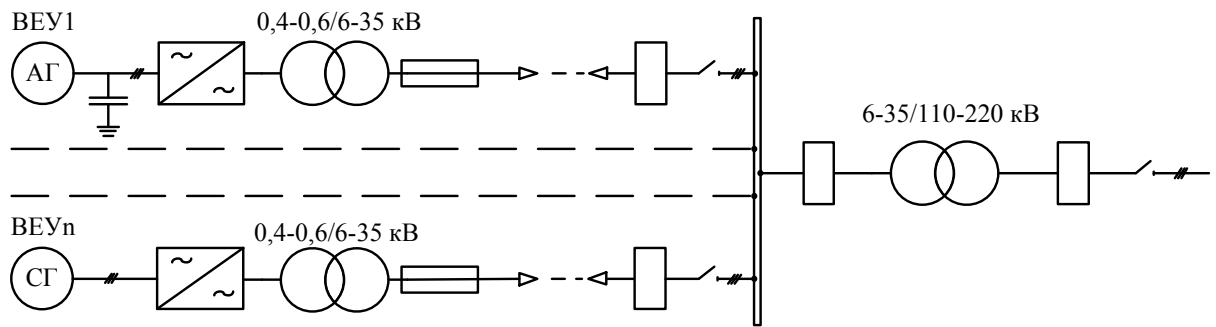


Рисунок 1.6 – Радіальна схема з'єднань вітропарків на базі вітроелектричної установки з асинхронними або синхронними генераторами непостійній частоти обертання і повним перетворенням вироблюваної енергії

За сприятливої геометрії рози вітрів може спостерігатися підключення декількох вітроелектричних установок на один трансформатор, середньої напруги.

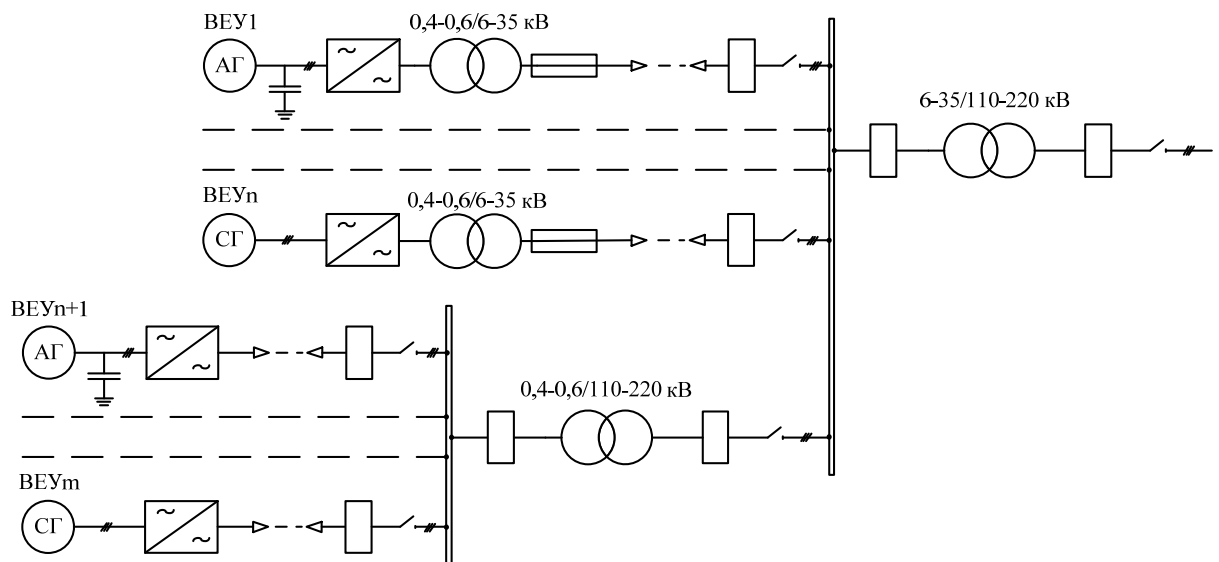


Рисунок 1.7 – Варіант складно розгалуженої радіальної схеми вітропарків

Слід зазначити, що використання вітроелектричних установок з електрогенераторами різних типів — за принципом дії та конструктивним виконанням — здебільшого має місце у процесі модернізації існуючих вітроенергетичних систем [4].

2 ВІТРОВИЙ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИЙ КОМПЛЕКС З ВЕРТИКАЛЬНОЮ ВІССЮ ОБЕРТАННЯ ВІТРОВОГО КОЛЕСА

2.1 Методика розрахунку конструкції безредукторного електромеханічного перетворювача енергії вітру в електричну

При проектуванні генератора, призначеного для використання у складі вітроенергетичних установок (ВЕУ), необхідно враховувати низку специфічних особливостей його роботи. Серед них – нестационарний характер сили та швидкості вітру у коротких часових інтервалах, значні динамічні моменти на валах генератора й вітротурбіни, а також відсутність мультиплікатора як механічного елемента, здатного демпфувати осьові зусилля. Крім того, генератор постійно перебуває у режимі перехідних процесів, які супроводжуються пульсуючими струмами, електродинамічними навантаженнями, додатковими втратами енергії та перегрівом активних елементів машини. Ще однією особливістю є відносно низька кругова швидкість обертання ротора.

Усі ці фактори обумовлюють необхідність зосередитися в процесі проектування електромеханічного перетворювача для ВЕУ на спрощенні конструкції, забезпеченні її міцності та надійності, ефективному тепловідведенні, а також зручності технічного обслуговування. Розрахуємо параметри генератора згідно методики [16].

Задамося номінальними параметрами перетворювача.

Номінальна потужність $P_n = 2 \text{ кВт}$.

Номінальна лінійна напруга $U_n = 230 \text{ В}$.

Номінальна частота обертання $n_n = 360 \text{ хв}^{-1}$.

Частота $f = 150 \text{ Гц}$.

Коефіцієнт потужності $\cos \varphi_n = 0,8$.

Число фаз $m = 3$.

Охолодження – повітряне, самовентиляція.

Розрахунок номінальних параметрів

1. Номінальна фазна напруга (при з'єднання обмотки статора в зірку Y)

$$U_{\text{нф}} = \frac{U_n}{\sqrt{3}} = \frac{230}{\sqrt{3}} = 133 \text{ В}.$$

2. Номінальна повна потужність

$$S_n = \frac{P_n \cdot 10^3}{\cos \varphi_n} = \frac{2 \cdot 10^3}{0,8} = 2,5 \cdot 10^3 \text{ В} \cdot \text{А}.$$

3. Номінальний фазний струм

$$I_{\text{нф}} = \frac{S_{\text{н}}}{\sqrt{3}U_{\text{н}}} = \frac{2.5 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 230} = 6.28 \text{ А.}$$

4. Число пар полюсів

$$p = \frac{60f}{n_i} = \frac{60 \cdot 150}{360} = 25.$$

5. Розрахункова потужність

$$S'_{\text{н}} = k_{\text{Е}} S_{\text{н}} = 1,08 \cdot 2.5 \cdot 10^3 = 2.7 \cdot 10^3 \text{ В} \cdot \text{А.}$$

Визначення розмірів ротора і статора

Вітрова турбіна заданої потужності має діаметр 1,2 метра. Прийmemo, що це і є внутрішній діаметр ротора генератора $D_{\text{р.вн}}$. Тоді зовнішній діаметр прийmemo:

$$D_{\text{р.зов}} = 1,17 D_{\text{р.вн}} = 1,17 \cdot 1,2 = 1,4 \text{ м}$$

Задавшись перевантажувальною здатністю генератора $M_{\text{м}}/M_{\text{н}} = 2,2$, знаходимо [16] індуктивний опір у відносних одиницях $x_{\text{д}}^* = 1,3$.

прийmemo $V_{\delta 0} = 0,95 \text{ В}_{\delta \text{н}} = 0,95 \cdot 0,89 = 0,846 \text{ Тл.}$

Приймаємо повітряний зазор під серединою полюса 0,003м. Зазор під кряями полюса

$$\delta_{\text{м}} = 1,5 \cdot \delta = 1,5 \cdot 0,003 = 0,0045 \text{ (м).}$$

Середнє значення повітряного зазору

$$\delta' = \delta + \frac{(\delta_{\text{і}} - \delta)}{3} = 0,003 + \frac{(0,0045 - 0,003)}{3} = 0,0035 \text{ і.}$$

Тоді внутрішній діаметр статора:

$$D = D_{\text{р.зов}} \cdot 2\delta' = 1,4 \cdot 2 \cdot 0,0035 = 1,407 \text{ м.}$$

Зовнішній діаметр статора

$$D_{\text{з}} = k_{\text{д}} D = (1,02 - 1,08) \cdot 1,407 = (1,487 - 1,507) \text{ м.}$$

де $k_{\text{д}} = 1,02 - 1,08$ [16]

Зовнішній діаметр статора прийmemo

$$D_{\text{з}} = 1500 \text{ мм} = 1,5 \text{ м.}$$

Полюсна поділка

$$\tau = \frac{\pi D}{2p} = \frac{\pi \cdot 1,407}{50} = 0,088 \text{ м} = 88 \text{ (мм).}$$

Розрахункова довжина статора.

З [16] для $\tau = 0,088 \text{ м}$ при $2p = 50$ знаходимо:

$$V_{\delta \text{н}} = 0,8 \text{ Тл.}$$

Задамося: $\alpha_{\delta} = 0,66$; $k_{\text{В}} = 1,15$; $k_{\text{обі}} = 0,92$; $\alpha_{\delta} \cdot k_{\text{В}} = 0,66 \cdot 1,15 = 0,76$, тоді

$$l_{\delta} = \frac{6,1S'_H}{\alpha_{\delta}k_Bk_{\text{обл}}AB_{\delta H}D^2n_H} = \frac{6,1 \cdot 2,5 \cdot 10^3}{0,76 \cdot 0,92 \cdot 10 \cdot 10^2 \cdot 0,8 \cdot 1,407^2 \cdot 120} = 0,115 \text{ м.}$$

Дійсна довжина статора

$$l_1 = 1,05 \cdot l_{\delta} = 1,05 \cdot 0,115 = 0,12 \text{ м.}$$

Розрахунок зубцевої зони статора.

Число паралельних віток статора приймемо

$a_1=1$, що кратне $2p=50$,

Із [16] для $\tau=0,088$ м знаходимо:

$$t_{1\min}=0,024 \text{ м,} \quad t_{1\max}=0,028 \text{ м.}$$

Максимальне число пазів (зубців) магнітопроводу статора

$$Z_{1\max} = \pi D / t_{1\min} = \pi \cdot 1,407 / 0,024 = 184.$$

Мінімальне число пазів (зубців) магнітопроводу статора

$$Z_{1\min} = \pi D / t_{1\max} = \pi \cdot 1,407 / 0,028 = 157,7.$$

Число пазів магнітопроводу статора приймаємо $Z_1 = 180$.

$$q_1 = Z_1 / (2pm) = 180 / (2 \cdot 3 \cdot 25) = 1,2,$$

причому $b=2$, $c=1$, $d=2$, $2p/(a_1d)=2 \cdot 25/(1 \cdot 2)=25$.

Тоді

$$t_1 = \frac{\pi D}{Z_1} = \frac{\pi \cdot 1,407}{180} = 0,0245 \text{ м.}$$

Число провідників в пазу:

$$u'_n = \frac{\pi a_1 D A}{Z_1 I_{\text{нф}}} = \frac{\pi \cdot 6 \cdot 1,407 \cdot 10 \cdot 10^2}{180 \cdot 6,28} = 23,45.$$

Так як u_n повинно бути парним числом, приймаємо $u_n=24$.

Уточняємо:

$$l_{\delta} = 0,115 \frac{u'_n}{u_n} = 0,115 \frac{23,45}{24} = 0,112 \text{ м};$$

$$l_1 = 0,112 \frac{u'_n}{u_n} = 0,12 \frac{23,45}{24} = 0,117 \text{ м.}$$

Розрахунок пазів і обмотки статора

Для попереднього визначання ширини паза b_{n1} задамося максимальною індукцією в зубці $B_{z1\max}=1,75$ Тл (рекомендований діапазон 1,6–2,0 Тл), тоді

$$b_{n1} = t_1 - \frac{B_{\delta H} t_1 l_{\delta}}{B_{z1\max} l_1 k_c} = 0,0245 - \frac{0,8 \cdot 0,0245 \cdot 0,112}{1,75 \cdot 0,117 \cdot 0,93} = 0,0129 \text{ м.}$$

Допустима густина струму обмотки статора:

$$\Delta_{\text{доп}} = 4,5 \text{ (А/мм}^2\text{)}$$

Поперечний переріз ефективного провідника обмотки статора:

$$q_{\text{эф}} = \frac{I_{\text{нф}}}{\Delta_{\text{доп}}} = \frac{6,28}{4,5} = 1,4 \text{ мм}^2$$

Вибираємо стандартний поперечний переріз:

$$q_{\text{ел}} = 1,53 \text{ мм}^2.$$

Прийmemo висоту паза:

$$h_{\text{пл}} = 15 \text{ (мм)}.$$

Індукція в спинці статора

$$B_a = \frac{\alpha_{\delta} B_{\delta H} \tau l_{\delta}}{2 h_a l_{\text{ст1}} k_c} = \frac{0,66 \cdot 0,8 \cdot 0,088 \cdot 0,112}{2 \cdot 0,0315 \cdot 0,117 \cdot 0,93} = 1,2 \text{ (Тл)},$$

$$h_a = \frac{(D_a - D)}{2} - h'_{\text{пл}} = \frac{(1,5 - 1,407)}{2} - 0,015 = 0,0315 \text{ м.}$$

Повне число витків фази обмотки статора:

$$w_1 = p q_1 u_n / a_1 = 25 \cdot 1,53 \cdot 24 / 6 = 120.$$

Крок обмотки:

$$y_1 = (0,8 - 0,86) \tau_y = (0,8 - 0,86) \cdot 7,5 = 6 - 6,45;$$

$$\tau_y = m q_1 = 3 q_1 = 3 \cdot 1,2 = 3,6$$

Прийmemo крок обмотки $y_1=3$

Активний опір обмотки статора

$$r_1 = \frac{\rho_{\theta} w_1 l_{\text{сп1}}}{q_{\text{ел}} a_1} = \frac{0,02135 \cdot 153 \cdot 0,3}{1,534 \cdot 6} = 0,11 \text{ (Ом)},$$

де ρ_{θ} – питомий опір міді, рівний 0,02135 Ом·м

$$l_{\text{нδ}} = 2l_1 + 0,5l_1 = 0,3 \text{ (м)}.$$

Індуктивний опір розсіювання фази статора:

$$x_{\sigma} = 15,8 \frac{f}{100} \left(\frac{w_1}{100} \right)^2 \cdot \frac{l_{\delta}}{p q_1} \cdot \lambda = 15,8 \frac{50}{100} \left(\frac{153}{100} \right)^2 \cdot \frac{0,112}{25 \cdot 1,2} \cdot 3 = 0,2 \text{ (Ом)}.$$

де λ – коефіцієнт питомої магнітної провідності розсіювання прийmemo рівним 3.

МРС обмотки збудження:

$$F_{\text{зб}} = 1,2 \cdot F_{\text{я}} = 1,2 \cdot I_{\text{фн}} \cdot w_1 = 1,2 \cdot 6,28 \cdot 153 = 1153 \text{ (АВ)}.$$

Задамося значенням струму збудження:

$$I_{\text{зб}} = 1 \text{ А}.$$

Кількість витків обмотки збудження:

$$w_{зб} = \frac{F_{зб}}{I_{зб}} = \frac{1153}{1} = 1153 .$$

Допустима густина струму обмотки збудження:

$$\Delta_{p,} = 3,28 \text{ (А/мм}^2\text{)}$$

Поперечний переріз ефективного провідника обмотки збудження:

$$q_{зб} = \frac{I_{зб}}{\Delta_{зб}} = \frac{1}{3,28} = 0,3 \text{ мм}^2$$

Знаходимо довжину полюсної дуги. Прийmemo $\alpha = 0,7$, тоді

$$b_p = \alpha \tau = 0,7 \cdot 0,088 = 0,061$$

Радіус дуги полюсного наконечника

$$R_p = \frac{D}{2 + 8D(\delta_m - \delta) / b_p^2} = \frac{0,925}{2 + 8 \cdot 1,407 \cdot (0,0045 - 0,003) / 0,061^2} = 0,141 \text{ м.}$$

Висоту полюсного наконечника прийmemo

$$h = 0,015 \text{ м.}$$

Довжина осердя полюса і полюсного наконечника:

$$l_m = l_p = l_l = 0,12 \text{ м.}$$

Висота полюсного сердечника

$$h_m \approx 0,016 + 0,186\sqrt[4]{\tau} = 0,016 + 0,116\sqrt[4]{0,088} = 0,08 \text{ м.}$$

Визначаємо коефіцієнт розсіювання полюсів:

при $k \approx 7,0$ [16]:

$$\sigma_m \approx 1 + k \cdot 0,35\delta / \tau^2 = 1 + 7,0 \cdot 0,35 \cdot 0,003 / 0,088^2 = 1,8.$$

Розрахуємо довжину полюсного сердечника, задавшись

$B_m = 1,45 \text{ Тл; } k_{cp} = 0,95$ (полюси виконані із сталі Ст3 товщиною 1 мм):

$$b_m = \frac{\alpha_\delta B_{\delta H} \tau l_\delta \sigma_m}{B_m k_{cp} l'_m} = \frac{0,66 \cdot 0,8 \cdot 0,088 \cdot 0,12 \cdot 1,8}{1,45 \cdot 0,95 \cdot 0,12} = 0,061 \text{ м.}$$

Будову безредукторної ВЕУ із суміщенням генератора і ВК у одну конструкцію показано на рисунку 2.1

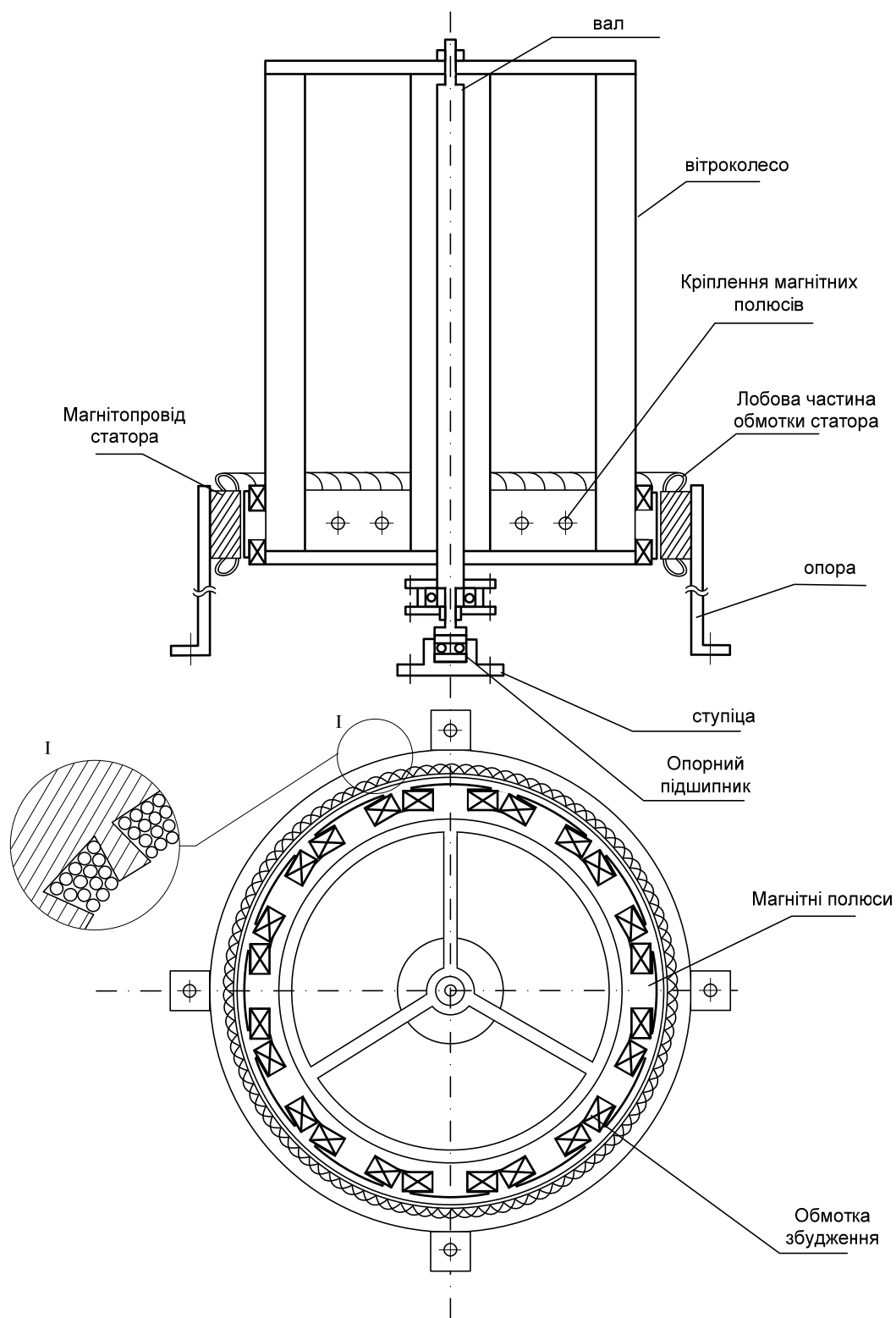


Рисунок 2.1 – Конструкція електромеханічного перетворювача енергії вітру в електричну

2.2 Постановка задачі мікропроцесорної реалізації системи автоматичного керування вітровим електротехнічним комплексом з вертикальною віссю обертання вітрового колеса

Сучасна техніка являє собою складні інтегровані системи, реалізовані на основі мікроелектроніки та засобів обчислювальної техніки з широким використанням мікропроцесорних технологій. Застосування мікропроцесорів у сфері енергетики, зокрема у вітроенергетиці, є цілком обґрунтованим і, більш того, необхідним кроком. Це дає змогу обробляти велику кількість змінних сигналів у режимі реального часу та реалізовувати керування енергетичною установкою відповідно до заданих алгоритмів [17].

У зв'язку з цим розроблено структуру мікропроцесорного пристрою, яка в сукупності з алгоритмами керування, сенсорами, перетворювачами сигналів і програмним забезпеченням формує повноцінну систему автоматичного керування вітроенергетичною установкою.

Для реалізації багатьох функцій апаратної частини достатньо можливостей, закладених у сучасні мікроконтролери, які зазвичай містять мультиплексори, аналогово-цифрові перетворювачі (АЦП), компаратори, модулі пам'яті тощо. Проте у випадках, коли ресурсів вбудованої апаратної частини недостатньо, передбачено можливість підключення зовнішніх модулів розширення, що дозволяє значно розширити функціональні можливості системи.

Далі основну увагу буде приділено розробці алгоритмів роботи та програмного забезпечення, оскільки архітектура мікропроцесорів є стандартною

2.3 Вибір сенсорів інформативних параметрів регулятора ВЕК

Одним із ключових етапів практичної реалізації запропонованого регулятора струму збудження вітроенергетичного комплексу (ВЕК) є вибір сенсорів інформативних параметрів, на основі яких здійснюється оптимальне керування. До таких параметрів належать: напруга, струм навантаження,

швидкість вітрового потоку та частота обертання вітрового колеса. Для забезпечення точного й надійного функціонування системи необхідно враховувати допустимі межі зміни кожного з цих параметрів.

Таблиця 1

Граничні значення інформативних параметрів

Номінальне значення постійної напруги	$U_H=250\text{ В}$
Номінальне значення струму навантаження	$I_H=5\text{ А}$
Максимальне значення швидкості вітру	$v = 30\text{ м/с}$
Максимальне значення частоти обертання	$n=1000\text{ об/хв}$

Під час вибору первинних вимірювальних перетворювачів струму та напруги слід враховувати, що ці величини в системі мають пульсуючий характер, хоча й залишаються близькими до постійних. У таблиці 2 наведено порівняльні характеристики відповідних сенсорів.

Таблиця 2

Порівняльна характеристика сенсорів струму та напруги

	Діапазон перетворення	Клас точності	Вихідний сигнал
Шунт 75 РИ	0 .. 7,5 А	1	0 .. 75 мВ
Сенсор струму на ефекті Холла LA 25-NP	0 .. 20 А	0,5	0 .. 5 В
Подільник напруги	0 .. 400 В	1,5	0 .. 0,15 В
Сенсор напруги на ефекті Холла LV 25-P	0 .. 500 В	1	0 .. 5 В

На основі аналізу можна виділити сенсори струму та напруги на основі ефекту Холла виробництва компанії LEM. Вони відрзняються високою точністю та надійністю, низькою нелінійною похибкою, стабільністю при температурних коливаннях, оптимальним часом затримки, завадозахищеністю, а також компактними масо-габаритними показниками. Додатковою перевагою є можливість гальванічної розв'язки між силовими та вимірювальними колами, що підвищує безпеку й надійність.

Основним критерієм при виборі сенсорів швидкості вітрового потоку є забезпечення високої точності та стабільної роботи за різних умов експлуатації. На сучасному ринку представлений широкий асортимент таких вимірювальних пристроїв, порівняльні характеристики яких подано в таблиці 3.

Таблиця 3

Порівняльна характеристика сенсорів швидкості вітру

	Діапазон перетворення	Похибка	Вихідний сигнал
Fischer 451213	0,5 .. 30 м/с	0,2 м/с	Імпульсний
ДСВ1.13	0,3 .. 35 м/с	2 м/с	Імпульсний
ДВ-160	0.2 ... 60.0 м/с	2 м/с	Кодовий
LB-747	0.5 ... 90.0 м/с	2 м/с	Кодовий

Найбільш оптимальним з-поміж них є сенсор Fischer 451213, який демонструє високу точність, низьку інерційність, хорошу чутливість, надійність і не залежить від кута нахилу при встановленні.

Серед сенсорів кутової швидкості найефективнішими виявилися оптикоелектронні моделі, що поєднують просту конструкцію, широкий діапазон вимірювань і високу точність. Їх порівняльні характеристики наведено в таблиці 4.

Таблиця 4

Порівняльна характеристика сенсорів кутової швидкості

	Діапазон перетворення	Вібраційне прискорення	Похибка	Вихідний сигнал
Оптичний НОА1888	0 .. 10000 об/хв	200 м/с ²	0,5 °	Імпульсний
Оптичний ЛИР-158	0 .. 10000 об/хв	100 м/с ²	0,5 °	Імпульсний
Тахогенератор	0 .. 10000 об/хв	100 м/с ²	1,2 %	0 .. 5 В
Магнітний FP210L	0 .. 500 об/хв	100 м/с ²	0,5 °	Імпульсний

2.4 Мікропроцесорна реалізація системи автоматичного керування вітровим електротехнічним комплексом

Відповідно до розробленої структури пристрою керування струмом збудження ВЕУ, здійснено перехід до мікропроцесорної реалізації цієї системи у складі електромеханічного перетворювача енергії. Для реалізації даного підходу необхідно забезпечити зчитування даних із n сенсорів параметрів (напруги, струму, швидкості тощо), обробку цієї інформації та її виведення на індикатор для візуального контролю з боку персоналу. Крім того, система повинна формувати керуючий вплив на струм збудження шляхом подачі сигналу на каскадний підсилювач. Також доцільно передбачити можливість архівування виміряних та обчислених параметрів у зовнішній блок пам'яті.

Мікропроцесорна реалізація пристрою керування струмом збудження ВЕУ здійснена на основі типового мікроконтролера ATmega8535 виробництва фірми Atmel [15].

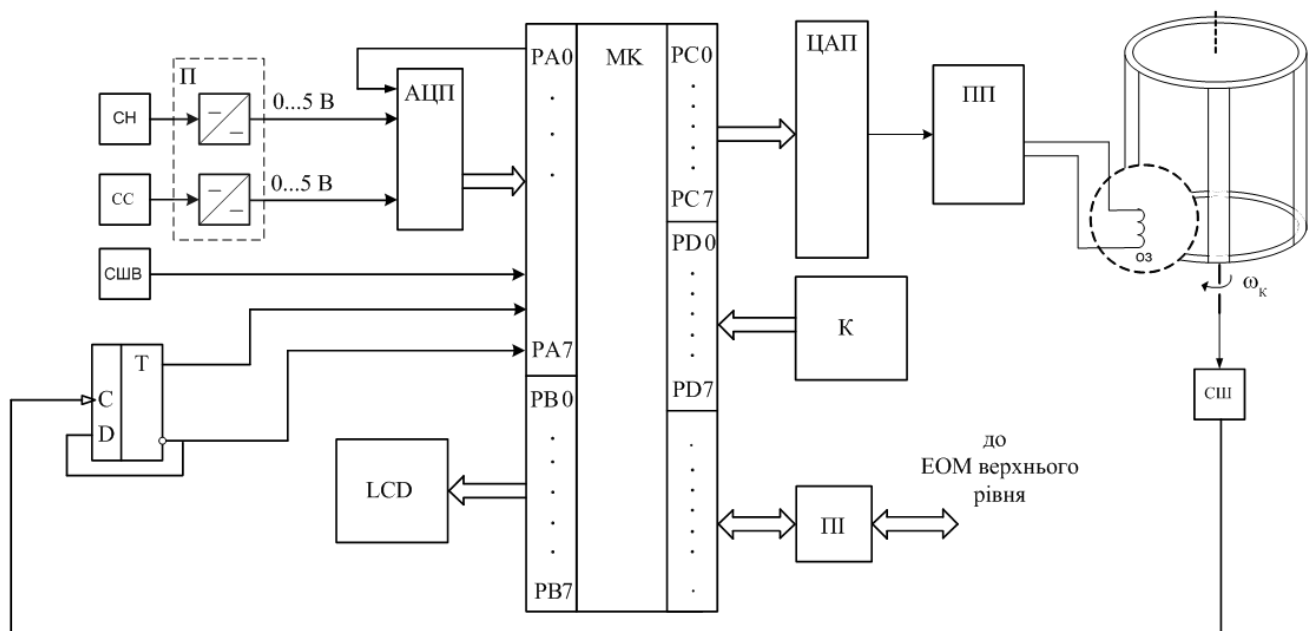


Рисунок 2.2 – Структурна схема мікропроцесорного пристрою керування струмом збудження генератора ВЕК

На рис. 2.2 представлено структурну схему мікропроцесорного пристрою керування струмом збудження ВЕУ, призначеного для роботи у точці відбору максимальної потужності зі стабілізацією вихідної напруги.

Позначення: СШВ – сенсор швидкості вітру; СШ – сенсор кутової швидкості обертання вітроколеса; СН – сенсор напруги; СС – сенсор струму навантаження; П – нормуючий перетворювач; АЦП / ЦАП – аналогово-цифровий / цифро-аналоговий перетворювач; МК – мікроконтролер; К – клавіатура; LCD – індикатор; ПП – каскадний підсилювач струму збудження; ОЗ – обмотка збудження; ПІ – послідовний інтерфейс; Т – D-тригер.

Сигнали з сенсорів (СН, СС, СШВ, СШ) подаються через нормуючі перетворювачі П на входи АЦП мікроконтролера МК (РА0–РА7). Сигнал з СШ попередньо проходить через D-тригер для фіксації імпульсів у момент та між імпульсами. МК виконує опитування каналів, обробку даних за заданим алгоритмом та формує керуючий вплив.

Керуючий сигнал передається через ЦАП на підсилювач ПП, який подає відповідний струм збудження на обмотку генератора ВЕУ (ОЗ). LCD-індикатор і клавіатура К забезпечують взаємодію з оператором. ПП забезпечує зв'язок із ЕОМ верхнього рівня для передачі та збереження даних.

Система підтримує роботу в двох режимах – на основі чіткої та нечіткої логіки – залежно від швидкості обертання вітрового колеса (детальніше описано у наступних підрозділах).

Алгоритм роботи мікропроцесорного пристрою керування ВЕУ (рис. 2.3) охоплює основні етапи збору, обробки та використання даних для формування керуючого впливу на струм збудження генератора з метою забезпечення роботи ВЕУ в точці максимальної потужності.

На початку здійснюється ініціалізація системи, зокрема обнулення пам'яті індикатора та виведення початкових даних. Далі послідовно зчитуються сигнали з сенсорів швидкості вітру та кутової швидкості обертання вітроколеса з урахуванням затримок, що моделюють фізичні часові затрати.

Відбувається перевірка:

- чи перевищує швидкість вітру мінімальний поріг запуску;
- чи здійснюється обертання вітроколеса;
- чи відповідає швидкість вітру граничному значенню b , від якого залежить вибір режиму керування (на основі чіткої або нечіткої логіки).

Далі алгоритм зчитує дані сенсорів струму та напруги навантаження, обчислює похідну ковзного середнього значення швидкості вітру, оптимальну кутову швидкість для відбору максимальної потужності та задаючи напругу для регулювання.

На основі поточних вимірювань і заданих алгоритмів обчислюється похибка регулювання (по кутовій швидкості й напрузі), значення струму збудження, а також виконується ПІ-регулювання.

Отриманий керуючий сигнал перетворюється у аналогову форму та подається на виконавчий каскад. У фінальній частині відбувається зчитування всіх величин з пам'яті мікроконтролера, передача їх на індикатор та ЕОМ. Після завершення циклу алгоритм перевіряє умови для повторного запуску або завершення роботи пристрою.

2.5 Комп'ютерне моделювання якості роботи системи керування і дослідження її на стійкість

Запропонована структура системи керування ВЕУ є суттєво нелінійною через дискретність у формуванні регулюючих впливів і нелінійність характеристик вітрового колеса та електромеханічного перетворювача. Це ускладнює застосування класичних методів оптимізації, тому для аналізу та

налаштування системи доцільно використовувати імітаційне комп'ютерне моделювання.

Стійкість і якість системи досліджено в середовищі Matlab/Simulink, яке дозволяє будувати модель із візуальним представленням структури та результатів. Модель реалізує закон керування системою з двома режимами – на основі чіткої та нечіткої логіки.

Моделювання дозволяє:

- Підбирати параметри регулятора для ВЕУ різної потужності;
- Визначати межі компенсації струму;
- Аналізувати поведінку системи за різних рівнів напруги та навантаження.

Для оцінки стійкості роботи та якості системи керування та регулятора зокрема отримати графік перехідної характеристики $h(t)$. Як відомо [18], це функція, яка описує реакцію системи на одиничний ступінчатий вплив:

$$l(t) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } t \geq 0, \\ 0, & \text{якщо } t < 0. \end{cases} \quad (2.1)$$

Схему моделі представлено на рис. 2.4.

Оптимальна швидкість турбіни залежно від швидкості вітру визначається через блок *Look-Up Table 1D (wort pu)*. Далі вона масштабуються до кутової швидкості за допомогою коефіцієнтів у блоці *Gain (Purb)*.

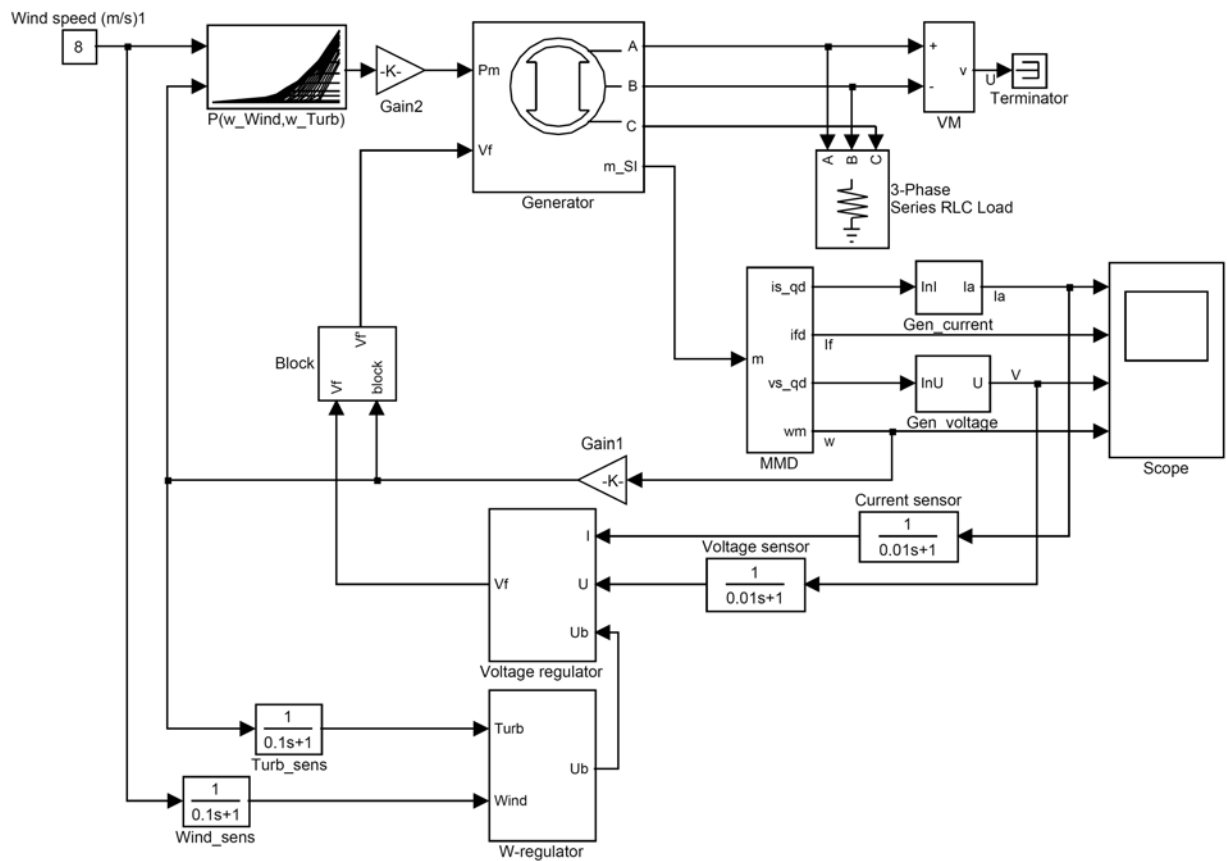


Рисунок 2.4 – Модель системи автоматичного керування ВЕК

Характеристика вітрового колеса – у вигляді поверхні представлена на рис. 2.5. Дана характеристика турбіни задається масивом *psbwindgen*, який ініціалізується в *Workspace*.

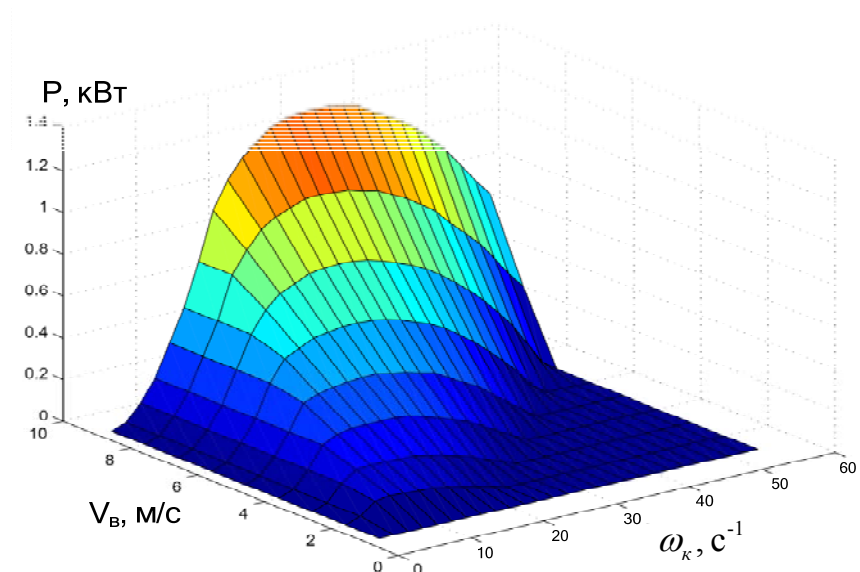


Рисунок 2.5 – Характеристика вітрового колеса ВЕУ

Керування реалізовано двома шляхами:

- За допомогою ПІ-регулятора, параметри якого оптимізуються через *NCDouport*;
- Через нечіткий регулятор (*Fuzzy Logic Controller*), який посилається на файл логіки типу *.fis*, попередньо активований у *Workspace*. Вікно параметрів нечіткої структури показано на рис. 2.6.

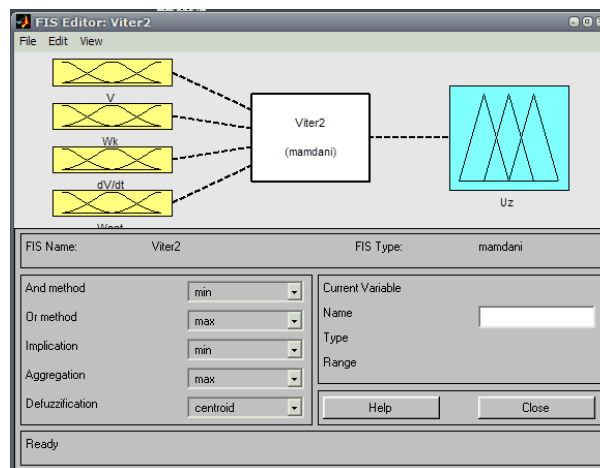


Рисунок 2.6 – Вікно параметрів нечіткої логічної структури *Viter2.fis*, пов'язаного з блоком *Fuzzy Logic Controller*

Перемикання між ПІ- і нечітким регулятором відбувається через блок *Switch*, керований умовою за швидкістю обертання. Параметри цього блоку наведено на рис. 2.7.

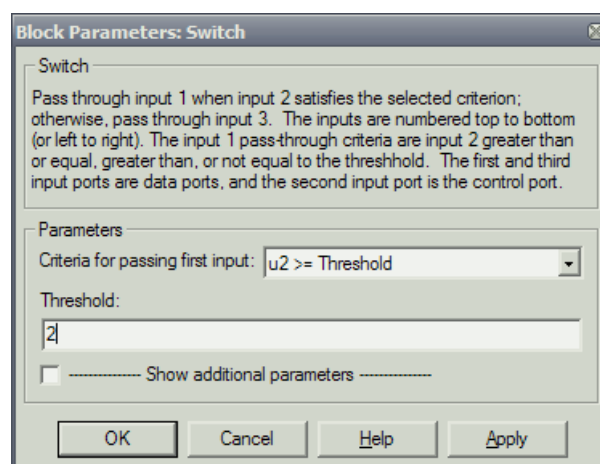


Рисунок 2.7 – Вікно властивостей блоку *Switch*

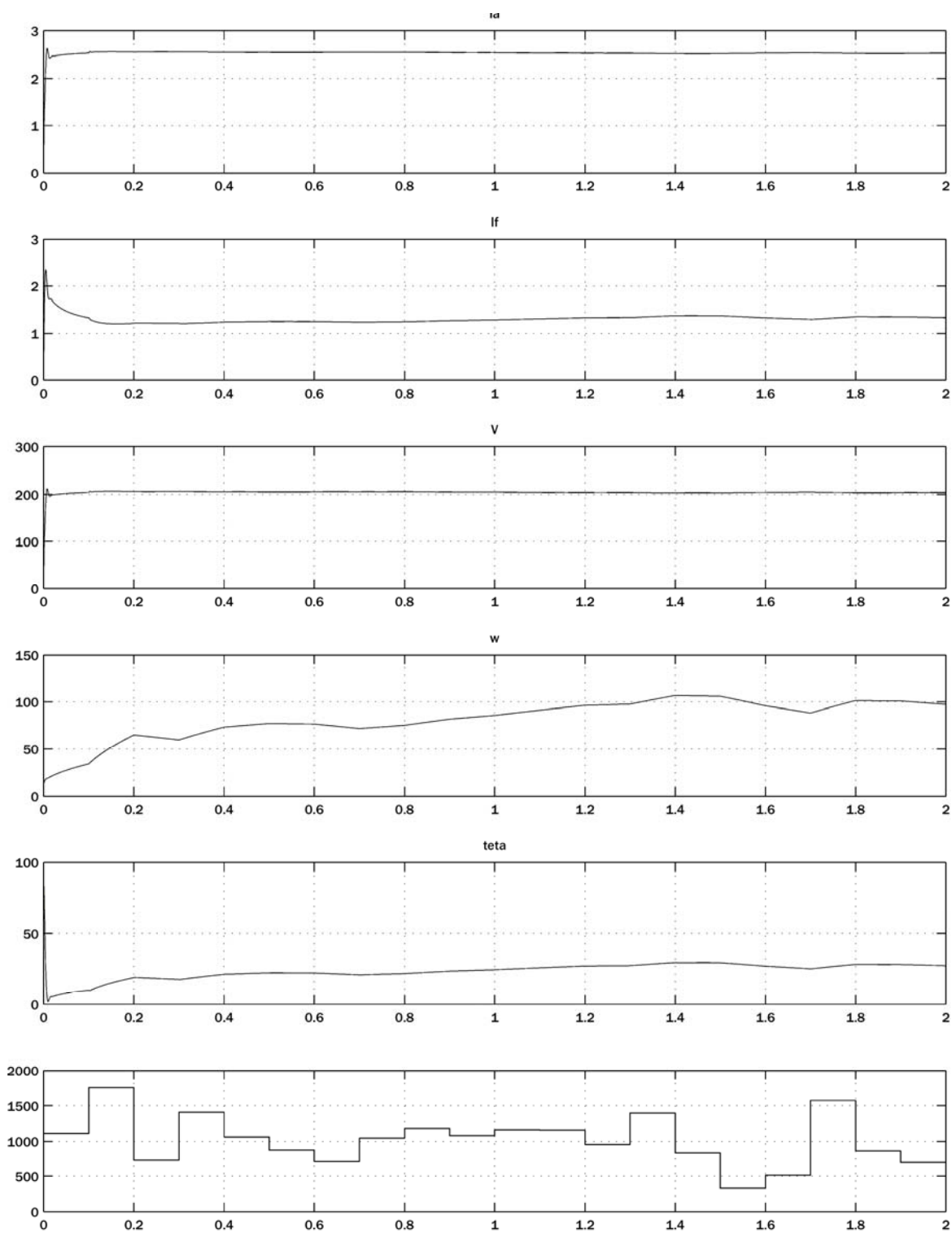


Рисунок 2.8 – Перехідні процеси ВЕУ при збуреннях з боку навантаження

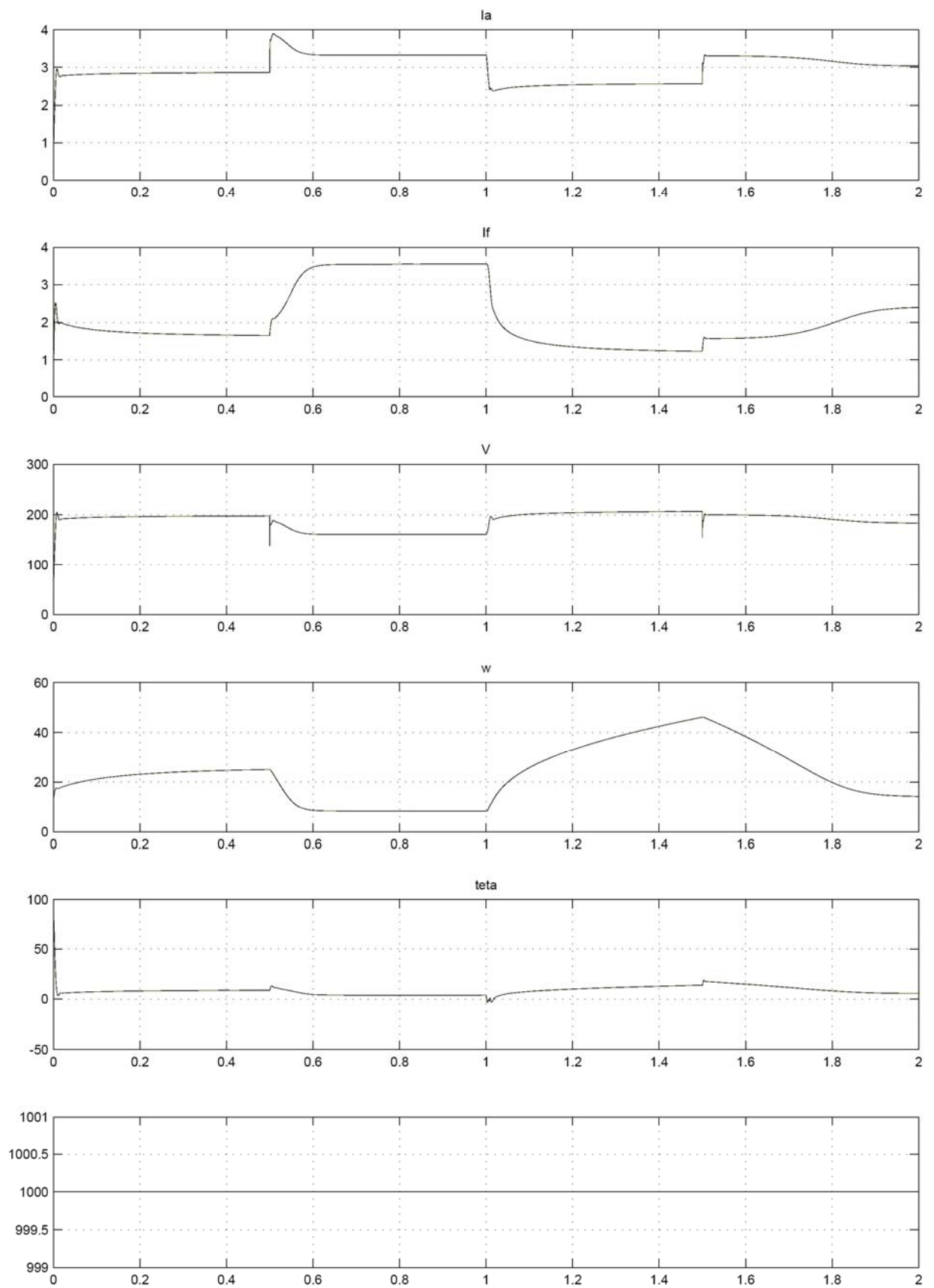


Рисунок 2.9 – Перехідні процеси ВЕК при збуреннях з боку вітру

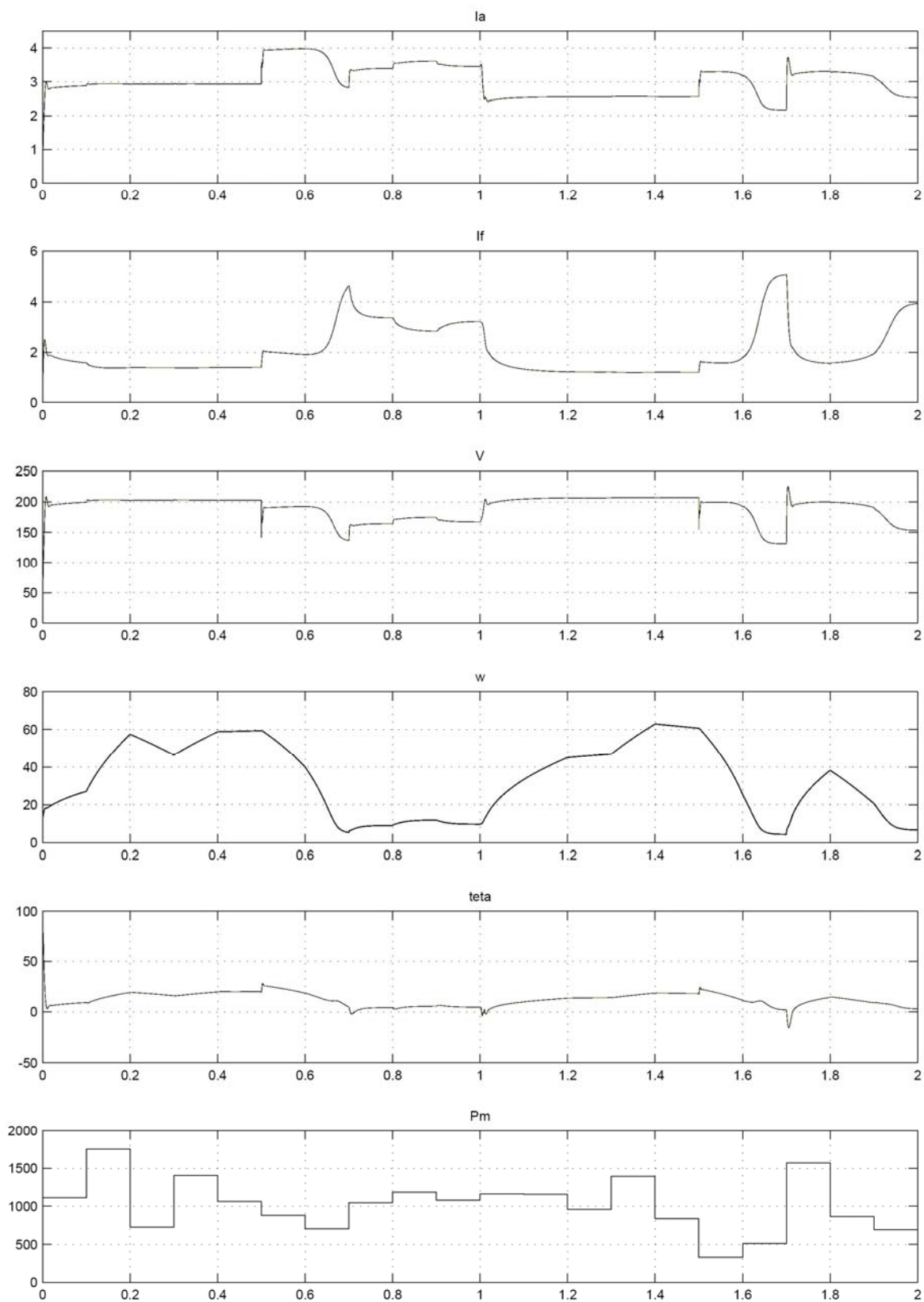


Рисунок 2.10 – Перехідні процеси ВЕК при збуреннях з боку вітру та навантаження

Очевидно, що система керування демонструє достатню стійкість за каналом регулювання напруги на навантаженні, що свідчить про забезпечення належної якості електроенергії, виробленої ВЕК. Водночас аналіз графіків показує недостатню здатність системи утримувати ВЕК у точці відбору максимальної потужності (ВМП). Це зумовлено потенційним конфліктом між забезпеченням стабільної напруги та досягненням режиму ВМП.

Отже, необхідно визначити пріоритет: або забезпечення максимальної потужності, або стабільної напруги, залишаючи другий параметр як допоміжний. Далі наведено результати моделювання для випадку, коли пріоритет надається відбору максимальної потужності шляхом збільшення вагового коефіцієнта k_{ω} , що впливає на формування задаючої напруги збудження.

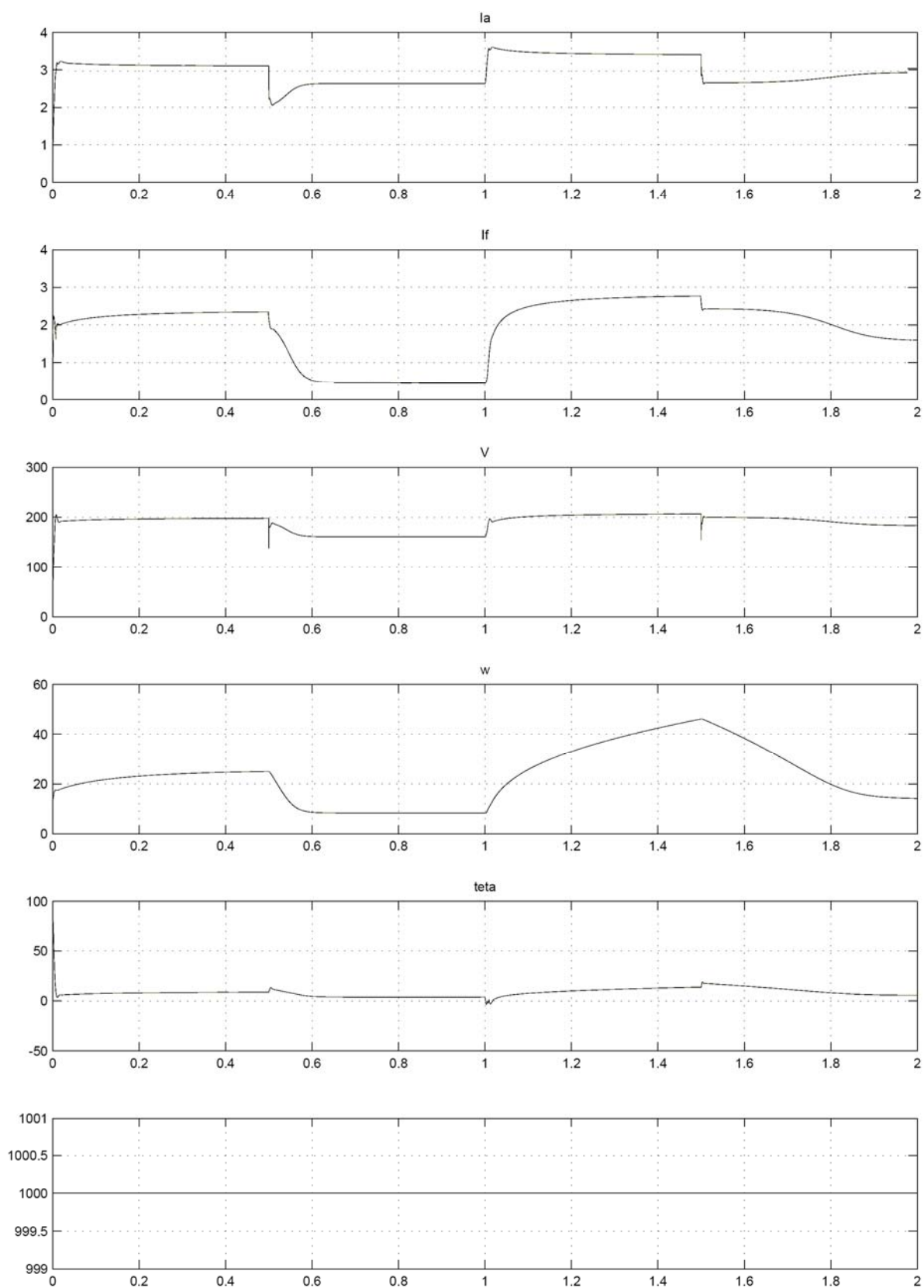


Рисунок 2.11 – Перехідні процеси ВЕК при збуреннях з боку вітру при роботі у функції відбору максимальної потужності

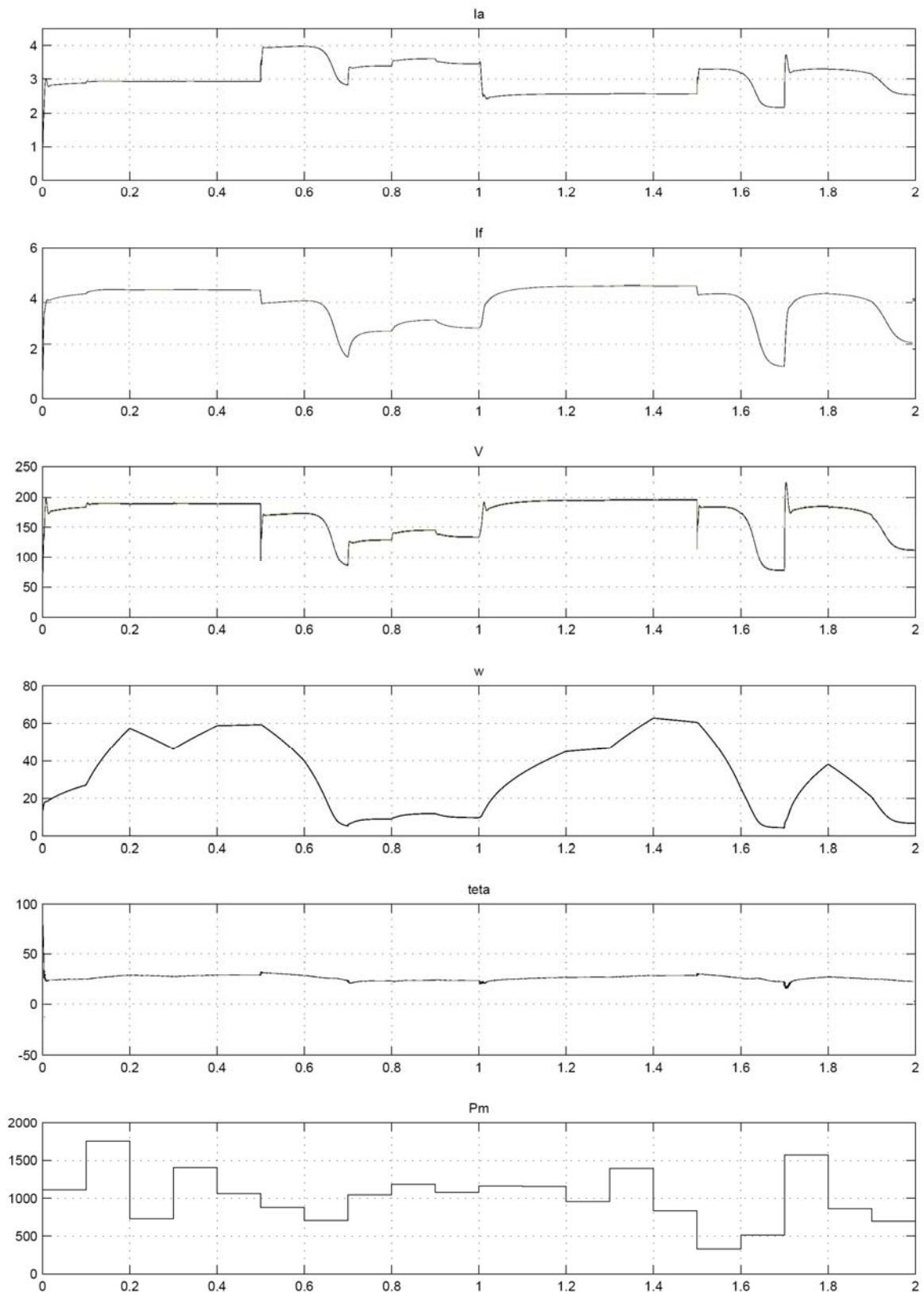


Рисунок 2.12 – Перехідні процеси БЕК при збуреннях з боку вітру та навантаження при роботі у функції відбору максимальної потужності

Проаналізуємо перехідні процеси у БЕК, отримані в результаті моделювання при збуреннях з боку навантаження (рис. 2.8). Зміна електричного

навантаження представлена у вигляді діаграми з розмахом від 450 до 1750 Вт. Пропорційно до потужності навантаження змінюється електромагнітний момент на валу вітрового колеса, що створюється електромеханічним перетворювачем. В процесі розгону ВК кутова частота напруги на виході перетворювача набирає значення від 20 Гц до 102 Гц, що відповідає кутовій швидкості обертання валу ВК $\omega = 2\pi f/p = 6,28 \cdot (20 \dots 102)/25 = 5 \dots 25$ рад/с при швидкості вітру 12 м/с. На проміжку часу від 0 до 0,6 хв ВЕУ виходить на усталений режим, що пояснюється зростанням кутової частоти і швидкості обертання валу. Стабілізації напруги на виході перетворювача сприяє контур зворотного зв'язку системи. Відповідно до зміни навантаження змінюється кут електромагнітного навантаження $teta$, що представлений графіком над діаграмою навантаження. Зміна навантаження порушує рівновагу електромеханічної системи та призводить до переходу в новий усталений режим. Система збудження генератора ВЕК намагається протидіяти цьому, підтримуючи напругу стабільною. Однак при незмінній швидкості вітру невідповідність між виробленою та спожитою енергією зумовлює зміну кутової швидкості обертання валу, що, відповідно, впливає на кутову частоту напруги ω . Наприклад, в момент часу 1,4 хв навантаження має тенденцію до зниження, що повинно привести до підвищення напруги, однак контур регулювання напруги протидіє цьому, встановлюючи такий струм збудження, який відповідає заданій напрузі з боку комбінованого (ПІ/нечіткого) регулятора швидкості обертання, взаємодія магнітних полів збудження та якоря приводить до нового усталеного режиму системи за швидкістю обертання, однак напруга на виводах перетворювача залишається стабільною. Графік зміни напруги (рис. 2.8) практично стабільний. Це свідчить про якість системи та вдало підібрані її параметри.

Процеси, які протікають в системі керування при постійному навантаженні (біля 1000 Вт), але зміні швидкості вітру від 6 до 12 м/с представлено діаграмою параметрів на рис. 60. Розгін ВК здійснюється при початковій швидкості вітру 12 м/с. В момент часу 0,5 хв промодельовано

зменшення швидкості вітру до 6 м/с. Зменшення механічної енергії на валу перетворювача призводить до зниження електроенергії, яка виробляється за допомогою ВЕУ. При постійному електричному навантаженні нестача електроенергії викличе зниження напруги та зростання струму навантаження. Для компенсації зниження напруги системою автоматичного керування збільшується струм збудження (ділянка діаграми I_f в межах 0,5...1 хв), що обмежує провал напруги до значення 180 В. Аналогічно може бути описаною робота системи керування при зворотній зміні вітру – тоді регулюючий вплив направлений на зниження струму збудження, що відповідає ділянці в межах 1...1,5 хв на діаграмах рисунок. 2.9.

Комбінований вплив збурень на систему керування як з боку зміни швидкості вітру, так і з боку зміни навантаження представлено на рис. 2.11. В цілому, отримані діаграми параметрів системи свідчать про її якість, оскільки при майже двократній зміні швидкості вітру та такому ж розмаху навантаження напруга залишається стабільною за виключенням ділянок в межах 0,7 та 1,6 хв, де спостерігаються провали напруги. Це пояснюється вичерпанням ресурсів системи збудження перетворювача при недостатній швидкості вітру та наростаючому навантаженні.

На рис. 2.12, 2.13 проілюстровано роботу системи керування ВЕУ, яка працює за законом відбору максимуму потужності. Як вже вказувалось, задача відбору максимуму потужності не завжди відповідає критерію підтримання стабільної напруги на виводах перетворювача. Розглянемо діаграми, представлені на рис. 2.12, де відображено роботу системи з постійним навантаженням та зміною швидкості вітру. При постійному навантаженні вихідна напруга (та потужність ВЕУ) будуть пропорційними до двох величин – струму збудження та швидкості вітру. При збільшенні швидкості вітру понад критичну (момент часу 1 хв) система відпрацьовує збільшення струму збудження I_f з метою збільшення гальмівного електромагнітного моменту перетворювача та утримання валу ВЕУ в точці оптимальної швидкості обертання з відбором максимальної потужності. Наростання струму збудження

відбувається до тих пір поки не припиниться наростання швидкості обертання ВК. Відповідно до зміни струму збудження змінюється напруга на виводах перетворювача, оскільки в системі керування навіть при відпрацюванні алгоритму пошуку роботи в точці відбору максимальної потужності, наявний контур регулювання напруги, але з меншим ваговим коефіцієнтом.

Діаграми на рисунку 2.10 пояснюють роботу системи керування з функцією відбору максимуму потужності при збуреннях як з боку вітру, так і з боку навантаження. При порівнянні аналогічних діаграм з рисунком 2.8 слід підкреслити, що за відхиленням напруги на виводах перетворювача більш якісною являється перший варіант, оскільки тривалість та амплітуда провалів та перенапруг менша, ніж в останньому випадку. Однак перевагою алгоритму відбору максимуму потужності являється робота електромеханічного перетворювача з більш рівномірним кутом електромагнітного навантаження $teta$.

2.6 Оцінка похибок вимірювальних каналів інформативних параметрів

В результаті вимірювального перетворення інформативних параметрів, що є вхідними для системи регулювання ВЕК, виникають похибки. Це знижує якість керування, а разом з цим і ефективність використання розробленої системи керування ВЕК. Тому виникає задача оцінки похибок вимірювальних каналів, з метою подальшого їх врахування в процесі регулювання струму збудження генератора.

Основний вклад у похибку вимірювальних каналів струму, напруги, швидкості вітру, швидкості обертання вносять сенсори відповідних величин. Допустимі границі похибки визначаються на основі паспортних даних сенсорів, представлених в табл. 6 – 9, та вибраного закону розподілу. Оскільки закон розподілу похибок вимірюваних величин є невідомим, тому виберемо найгірший варіант – рівномірний розподіл.

При цьому виникає проблема в тому, що похибки кожного з сенсорів виражається у різних одиницях вимірювання. Це не дозволяє оцінити

сумарну похибку вимірювальних каналів. Тому слід представити всі похибки у відносних одиницях до граничного значення.

Крім того важливим є врахування похибок аналого-цифрового перетворення. Наприклад, для сенсорів струму та напруги перетворення аналогових сигналів відбувається за допомогою АЦП, похибка якого залежить від розрядності. Тому при розрахунку похибок також будемо враховувати похибки аналого-цифрового перетворення.

Використовуючи відому методику, що наведена в [19], проведемо оцінювання похибок вимірювальних каналів на основі паспорних даних відповідних сенсорів напруги (табл. 2.1), струму (табл. 2.2), кутової швидкості (табл. 2.3), швидкості вітру (табл. 2.4). Результати оціненого СКВ похибки у відносних одиницях зведемо в таблицю 2.5.

Таблиця 2.5

Результати оцінювання похибок вимірювальних каналів

Вимірювальний канал	СКВ похибки
Напруги	$\sigma_U = 0.0055$
Струму	$\sigma_I = 0.0032$
Кутової швидкості	$\sigma_w = 0.4$
Швидкості вітру	$\sigma_v = 0.4$

Тоді сумарну похибку вимірювання інформативних параметрів системи керування знайдемо наступним чином:

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_U^2 + \sigma_I^2 + \sigma_w^2 + \sigma_v^2} = 0.0073 \approx 1\%.$$

Отже оцінена похибка вимірювальних каналів системи керування не перевищує 1%, і не буде суттєво впливати на якість керування струмом збудження ВЕК.

ВИСНОВКИ

У результаті проведеного дослідження отримано наукові та практичні результати, серед яких варто відзначити такі:

1. Визначено сферу доцільного застосування вітроенергетичних комплексів з вертикальною віссю обертання, зокрема для електропостачання віддалених об'єктів, що є актуальним для підвищення енергобезпеки авіаційних підприємств.

2. Запропоновано структуру системи керування БЕК, яка забезпечує роботу установки в точці максимальної потужності. Система передбачає гібридне керування – з використанням ПІ- та нечіткого регуляторів залежно від поточних умов.

3. Промодельовано в середовищі Matlab/Simulink структуру запропонованої системи автоматичного керування струмом збудження БЕК. Проведено аналіз стійкості роботи системи та якості генерованої напруги.

4. Запропоновано конструкцію електромеханічного перетворювача, у якій генератор та вітрове колесо об'єднані в єдину конструкцію. Для цієї конструкції адаптовано методику визначення параметрів і наведено приклад її практичного застосування.

У процесі виконання дослідження було зроблено доповідь на науково-технічній конференції та опубліковано тези доповіді:

[Redacted text block]

Отримані результати можуть бути використані для створення автономних систем енергозабезпечення в умовах обмеженого доступу або пошкоджень централізованої електромережі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. [REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED]

2. Сінчук, О.М. До питання проектування вітроенергетичних станцій в умовах авіаційних підприємств / О.М. Сінчук, С.М. Бойко, А.В. Некрасов, М.О. Ножнова, М. М. Федь // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. – 2020 – Том 31 (70) № 3. – С. 153-157.

3. Сінчук, О.М. Аналіз факторів впливу на основні енергетичні характеристики вітроенергетичних станцій, що експлуатуються в умовах авіаційних підприємств / О.М. Сінчук, С.М. Бойко, А.В. Некрасов, М.О. Ножнова, А.О. Онищенко // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. – 2020 – Том 31 (70) № 2. – С. 256-261.

4. [REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED]

5. Енергетична стратегія України на період до 2035 р. // Сайт Міністерства енергетики та вугільної промисловості України: [Електронний ресурс]: <http://mpe.kmu.gov.ua>.

6. Кінаш Р.І. Вітрове навантаження і вітроенергетичні ресурси в Україні / Р.І.Кінаш, О.М.Бурнаєв. – Львів: Видавництво науково-технічної літератури, 1998. – 1152 с.

7. [REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED]

8. [REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

9. Кузнєцов М.П. До визначення вітропотенціалу за даними електронної реєстрації швидкості вітру / М.П.Кузнєцов // Відновлювана енергетика XXI століття: VIII міжнар. конф., 17–21 вересня 2007 р.: тези доп. – АР Крим. – 2007. – С. 127–131.

10. Мартазінова В.Ф. Оцінка вітропотенціалу України на довгострокову перспективу / [В.Ф.Мартазінова, О.К.Іванова, Т.А.Сологуб і ін.] // Труды Шмеждународ. конф. «Нетрадиционная энергетика в XXI веке». – АР Крым, Судак, 2002. – С. 87–90.

11. [REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

12. Пекур П.П. Аналітичне зображення щільності ймовірності та функції розподілу швидкості вітру / П.П.Пекур // Відновлювана енергетика. – 2005. – № 2. – С. 53–58.

13. Пекур П.П. Стохастичне моделювання динаміки повітряного потоку в приземному шарі атмосфери за довільної функції розподілу швидкості вітру / П.П. Пекур // Відновлювана енергетика. – 2005. – № 3-4. – С. 29–33.

14. Площинки для вітрових електростанцій. Метеорологічні дослідження характеристик вітру: ГКД 341.003.003.006:2000 – Офіц. вид. К.: Мін-во палива та енергетики України, 2001. – 30 с. – (Нормативний документ Мінпаливенерго України).

15. ATMEGA8535 - мікроконтролер [Електронний ресурс] // RCS Components. – Режим доступу:

https://www.rsccomponents.kiev.ua/product/atmega8535-16pu_22001.html

16. [REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED]

17. [REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED]

18. [REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED]

19. Ціделко В.Д. Невизначеність вимірювання. Обробка даних і подання результату вимірювання / В.Д. Ціделко, Н.А. Яремчук. – К.: ІВЦ Видавництво Політехніка, 2002. – 176 с.