

Т : МУЛЬТИФІЗИЧНА ВІЗУАЛЬНО-БЛОЧНА
МОДЕЛЬ ЕЛЕМЕНТА ПЕЛЬТЬЄ

АНОТАЦІЯ

Науково-дослідна робота містить: 32 стор., 25 рис., 10 джерел літератури

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, ВІЗУАЛЬНО-БЛОЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, ЕЛЕМЕНТ ПЕЛЬТЬЄ, ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИЙ ОХОЛОДЖУВАЧ, ТЕМПЕРАТУРНИЙ КОЕФІЦІЄНТ ОПОРУ

В роботі здійснено синтез мультифізичної візуально-блочної моделі елемента Пельтьє, яка описує термодинамічні, термоелектричні та електричні процеси. Модель синтезована за допомогою методу візуально-блочного моделювання. Наведена реалізація даної моделі у середовищі MATLAB.

Результати моделювання та їх співставлення з експериментом дозволяє зробити висновок про високий ступінь адекватності отриманої моделі. На відміну від існуючих підходів до опису елемента Пельтьє дана модель також описує його температурний коефіцієнт опору та динамічні властивості.

Запропонована модель може бути використана для широкого спектру пристроїв на базі елементів Пельтьє. Універсальний характер даної моделі дозволяє застосувати її в подальшому для дослідження та проектування термоелектричних джерел електричної енергії. Важливою властивістю отриманої моделі є досить адекватний опис її динамічних характеристик як елемента електричної схеми, що дозволяє вирішувати питання щодо проектування джерел електроживлення елементів Пельтьє та систем автоматичного керування на їх основі.

ЗМІСТ

	Стор.
Вступ	4
1 Аналіз проблеми та постановка задачі дослідження	5
1.1 Принцип роботи елемента Пельтьє	5
1.1.1 Ефект Зеебека	5
1.1.2 Ефект Пельтьє	6
1.2 Будова елементів Пельтьє	7
1.3 Застосування елементів Пельтьє	9
1.4 Застосування елементів Пельтьє для підготовки повітря озонаторів	11
2 Розробка математичної моделі	12
2.1 Модель елемента Пельтьє	12
2.2 Модель радіатора гарячої сторони	19
2.3 Модель радіатора холодної сторони	20
2.4 Модель джерела живлення	20
2.5 Зборка моделі	21
3 Моделювання пристрою на базі елемента Пельтьє	22
3.1 Реалізація моделі елемента Пельтьє у середовищі MATLAB	22
3.2 Перевірка адекватності моделі експериментом	23
3.3 Результати моделювання	29
Висновки	31
Перелік джерел посилання	32

ВСТУП

Елементи Пельтьє або термоелектричні охолоджувачі знаходять дедалі ширше застосування в різних галузях промисловості — від високоточних систем охолодження до автономних рішень для збору енергії. За останні десятиліття провідні наукові установи та фахівці провели значні дослідження, спрямовані на підвищення ефективності та точності моделювання елементів Пельтьє. Більшість практично впроваджених на сьогодні моделей орієнтовані переважно на статичні характеристики та ефективність перетворення енергії, тоді як динамічні властивості часто спрощуються або залишаються поза увагою.

Світові тенденції в моделюванні включають до себе мультифізичний підхід, що розглядає одночасно різні фізичні явища. Такий підхід робить можливим створення адекватної моделі елемента Пельтьє, що розглядає термодинамічні, термоелектричні та електричні процеси. Сучасні програмні продукти також роблять можливим легке впровадження моделей які розглядають динамічні системи.

У цьому контексті актуальність даної роботи обумовлена потребою в розробці моделі, яка б відображала складну взаємодію фізичних процесів в елементі Пельтьє, зокрема й перехідні процеси, що є важливим при проектуванні систем керування та живлення.

Основною метою даної роботи є створення мультифізичної візуально-блочної моделі елемента Пельтьє, яка описує термодинамічні, термоелектричні та електричні процеси та враховує його динамічні характеристики. Потенційними сферами застосування моделі є проектування систем автоматичного керування, розробка ефективних джерел живлення для елементів Пельтьє, а також інші застосунки, які потребують точного динамічного моделювання.

Ця робота доповнює наявні роботи в галузі, пропонуючи візуально-блочну модель що враховує температурний коефіцієнт опору (ТКО) та адекватно показує динамічні властивості системи. Врахування ТКО робить модель адекватною при значних змінах температури. Універсальність запропонованої моделі робить її придатною до широкого спектру інженерних та наукових завдань, пов'язаних із використанням елементів Пельтьє.

1 АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Принцип роботи елементів Пельтьє

Робота елемента Пельтьє ґрунтується на термоелектричних ефектах Зеебека та Пельтьє.

1.1.1 Ефект Зеебека

Ефект Зеебека проявляється як електрорушійна сила (ЕРС) що з'являється коли перехід між двома різними провідниками (А і Б) нагрівається. Найпоширеніший пристрій базований на ефекті Зеебека – термопара. На рисунку 1.1 можна побачити схематичне зображення переходів термопари.

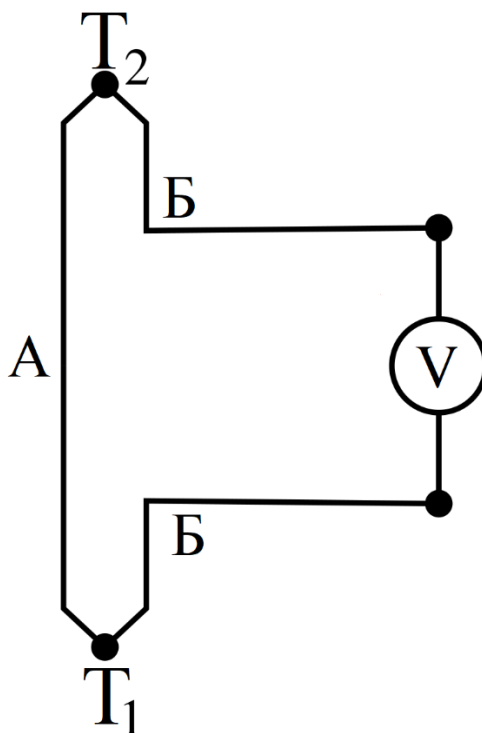


Рисунок 1.1 – Схематичне зображення переходів термопари

ЕРС залежить від різниці температур ΔT між двома переходами T_1 і T_2 та коефіцієнту Зеебека [1]. Коефіцієнт Зеебека визначається як:

$$\alpha_{AB} = \frac{\varepsilon}{\Delta T}$$

Де α_{AB} – коефіцієнт Зеебека для пари різних провідників, ε – ЕРС та ΔT – різниця температур двох переходів. Коефіцієнт Зеебека також називають коефіцієнтом термоелектрорушійної сили (термоЕРС), та ЕРС генерована цим ефектом також називається термоЕРС. Ефект Зеебека часто використовується для виміру температур, термопари для цього зазвичай виконані з двох різних металів чи сплавів металів. Наприклад мідь та константан мають різницю коефіцієнтів Зеебека 40 мкВ/К. Через те що термопара вимірює різницю температур між двома переходами, другий перехід зазвичай поміщають у середовище з відомою температурою, наприклад, у ванну льоду, температура якої буде приблизно 0 °С.

1.1.2 Ефект Пельтьє

Ефект Пельтьє описує виділення чи поглинання тепла яке відбувається коли електричний струм протікає крізь перехід між двома різними провідниками [2]. Коефіцієнт Пельтьє визначається як:

$$P_{AB} = \frac{Q}{I}$$

Де P_{AB} – коефіцієнт Пельтьє для пари різних провідників, Q – тепловий потік, I – електричний струм

Так само як ефект Зеебека, ефект Пельтьє має два переходи між провідниками. На одному з переходів тепло буде поглинатися, а на іншому виділятися.

Коефіцієнт Пельтьє пов'язаний з коефіцієнтом Зеебека другим співвідношенням Томсона:

$$P = \alpha T$$

Де P – коефіцієнт Пельтьє, α – коефіцієнт Зеебека, T – абсолютна температура.

На рисунку 1.2 можна побачити порівняння ефекту Зеебека та Пельтьє.

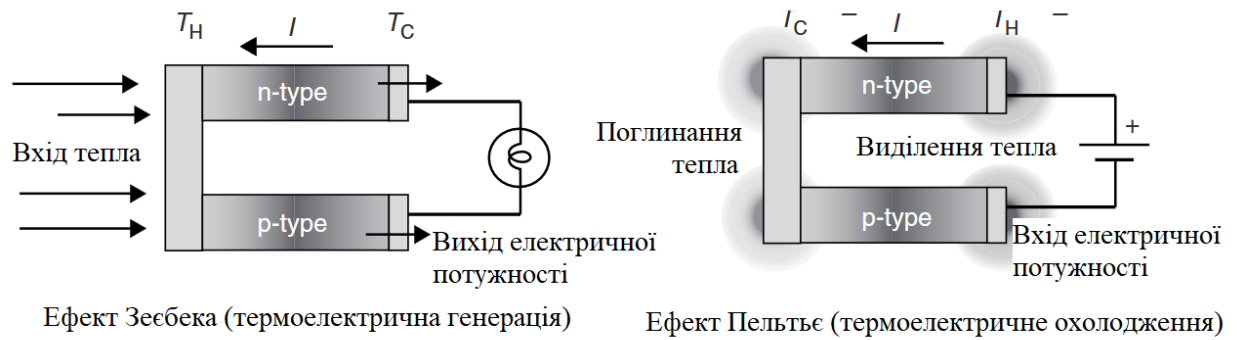


Рисунок 1.2 – Термоелектричний генератор та термоелектричний охолоджувач [3]

1.2 Будова елементів Пельтьє

Елементи Пельтьє (термоелектричні охолоджувачі, термоелектричні модулі (TEM), thermoelectric cooler (TEC)) це пристрої які реалізують на практиці термоелектричні ефекти. Типовий елемент Пельтьє можна побачити на рисунку 1.3.

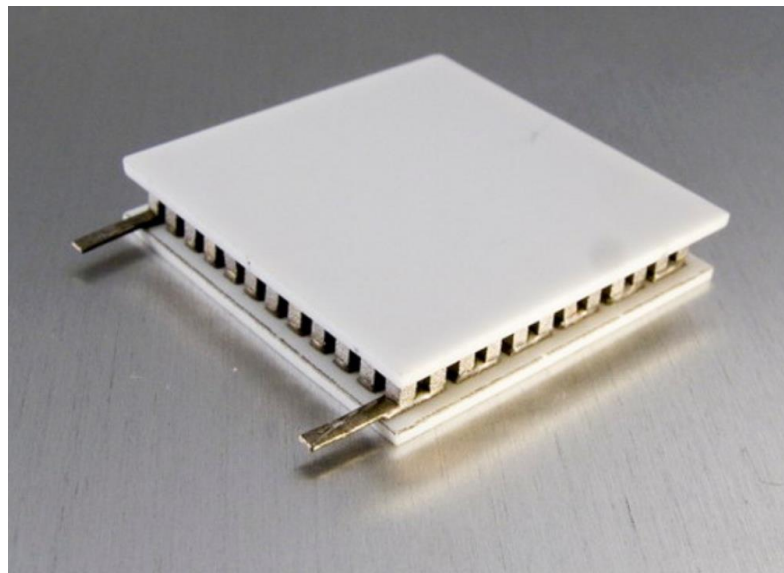


Рисунок 1.3 – Елемент Пельтьє

Через те що коефіцієнт Зеебека індивідуальних термопар є малим, у елементах Пельтьє термопари з'єднані послідовно з електричної точки зору, але паралельно з термічної точки зору, так як керамічні пластини є ізолятором для

електричного струму, але гарним провідником для тепла. Побачити внутрішню конструкцію елемента Пельтьє можна на рисунку 1.4.

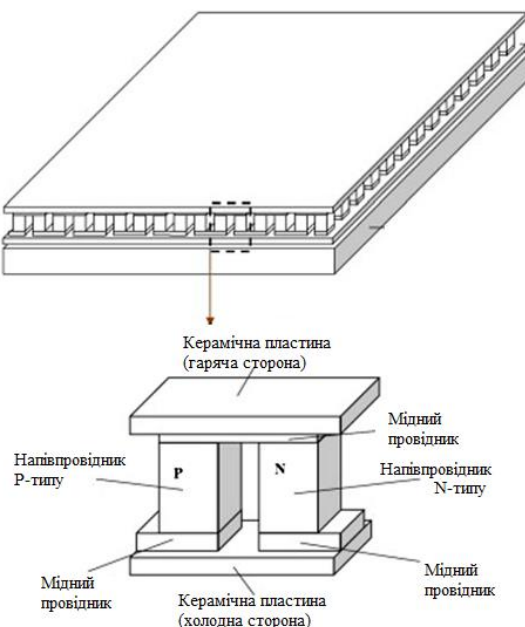


Рисунок 1.4 – Розріз термопари елемента Пельтьє [4]

Через те що з такою конструкцією половина термопар буде мати напрямок струму від холодної до гарячої сторони, а інша половина від гарячої до холодної, використовуються матеріали які мають коефіцієнти Зеєбека відносно міді різних знаків. Зазвичай це напівпровідниковий матеріал р та n типу. Типовий матеріал для термоелектричних модулів – телурид вісмуту [5].

Варто зазначити що термопари елементів Пельтьє мають значний опір. Через це на них виділяється тепло за законом Джоуля – Ленца. У той час коли потужність яку за ефектом Пельтьє модуль "перекачує" пропорційна струму, потужність резистивного нагрівання пропорційна квадрату струму. Втрати на опорі погіршують ККД елементів Пельтьє.

Термічний опір між гарячою та холодною сторонами є малим, через те що між сторонами стоїть багато стовпів з напівпровідникового матеріалу, що доволі добре проводять тепло. Малий опір між сторонами також негативно впливає на ККД.

Тобто, для отримання елемента Пельтьє з гарним ККД потрібні термоелектричні матеріали з малим електричним опором та великим термічним опором. Так як і на електричний опір і на термічний опір впливає рухливість електронів, ідеальний матеріал отримати не вдалось. Через це елементи Пельтьє мають малий ККД. [6]

1.3 Застосування елементів Пельтьє

Незважаючи на недоліки, термоелектричні модулі знаходять доволі широке застосування у різноманітній апаратурі.

У споживчому обладнанні елементи Пельтьє знаходять застосунки, розглянемо найрозповсюджені з них:

- Автомобільні холодильники – у цьому застосунку елементи Пельтьє використовуються через компактність та меншу вартість ніж компресорні холодильники. Холодильники на основі елементів Пельтьє можуть знизити внутрішню температуру на 20 °C у порівнянні з температурою навколишнього середовища. На рисунку 1.5 можна побачити охолоджуючий агрегат холодильника на базі елемента Пельтьє. Видно що була приділена увага ізоляції холодної сторони від гарячої, усі порожнини заповнені ізолюючою піною, кріплення радіаторів зроблено так що металеві частини холодної та гарячої сторони не торкаються.

- Осушувачі повітря – у цьому застосунку елементи Пельтьє також використовуються через компактність та меншу вартість ніж компресорні охолоджувачі.

У індустріальних та наукових застосунках елементи Пельтьє також знаходять попит:

- Термостатування – елементи Пельтьє є дуже привабливими для термостатування об'єктів, так як вони можуть переміщувати тепло в обох напрямках, у залежності від напрямку струму крізь елемент. Деякі застосунки де може використовуватися елемент Пельтьє для термостатування: калібратори

термометрів, термостатування лазерних діодів, камери тепла і холода, інкубатори.

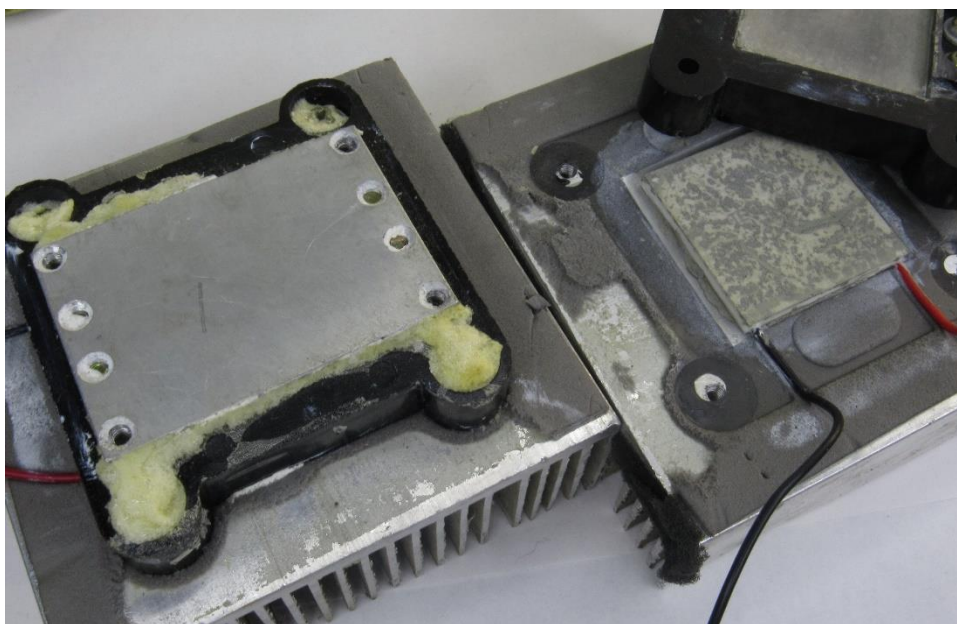


Рисунок 1.5 – Охолоджуючий агрегат холодильника на базі елемента Пельтьє

З використанням зворотного зв'язку, термостат на елементах Пельтьє може досягати стабільності краще ніж $\pm 0,01$ °C. На рисунку 1.6 можна побачити ТЕМ встановлений у корпус лазерного діоду, де ТЕМ буде термостатувати діод для підтримки незмінної довжини хвилі лазера. У таких застосунках використовують багатокаскадні ТЕМ, вони дозволяють досягти більшої різниці температур між сторонами через послідовне з'єднання декількох елементів Пельтьє. Недолік багатокаскадних ТЕМ – менша потужність охолодження.

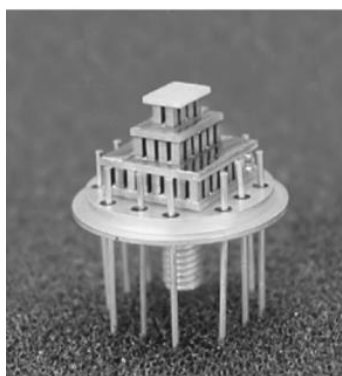


Рисунок 1.6 – ТЕМ встановлений у корпус лазерного діоду [3]

1.4 Застосування елементів Пельтьє для підготовки повітря озонаторів

У науково дослідній лабораторії промислової електроніки [REDACTED] вже на протязі декількох років займаються розробкою високоефективних генераторів озону на базі височастотного бар'єрного розряду. На рисунку 1.7 можна побачити озонатори розробки НДЛ промислової електроніки



Рисунок 1.7 – Озонатори розробки НДЛ промислової електроніки

Під час досліджень співробітники лабораторії стикнулись з технічною проблемою яка пов'язана з необхідністю осушення повітря що використовується для електросинтезу озону. Одним з шляхів вирішення цієї проблеми є побудова пристрою осушення повітря шляхом його охолодження за допомогою елементів Пельтьє.

Але для побудови даного пристрою з оптимальними технічними параметрами режиму використання потрібна адекватна мультифізична математична модель яка б могла відтворювати не тільки статичні а й динамічні характеристики елемента Пельтьє. Аналіз літературних джерел показав що на теперішній час математичні моделі що задовольняють потреби розробника не існують. Таким чином була актуалізована науково-технічна проблема створення даної мультифізичної моделі елемента Пельтьє.

2 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ

Синтез математичної моделі здійснено за допомогою методу візуально-блочного моделювання, який був розроблений та розвивається на кафедрі Електроніки інформаційних систем та програмного забезпечення в рамках напряму НДЛ «Промислова електроніка» та студентської науково-проблемної групи «Моделювання складних електротехнічних комплексів».

2.1 Модель елемента Пельтьє

Модель елемента Пельтьє складається з:

- Термодинамічна система;
- Електрична система;
- Термічний опір середовище-сторона;
- Термічний опір між сторонами;
- Потужність Пельтьє;
- Температурний коефіцієнт опору;

Термодинамічна система реалізує теплоємність сторін, враховуючи їх масу, питому теплоємність та початкову температуру.

Термодинамічну систему однієї зі сторін можна побачити на рисунку 2.1. Крайній лівий блок – суматор, до якого входять усі потужності, що додаються чи віднімаються. Потужності, що віднімаються позначені кружечком на вході.

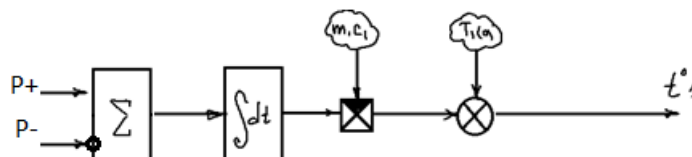


Рисунок 2.1 – Термодинамічна система однієї сторони

Сума потужностей інтегрується за часом, ми отримуємо загальну кількість енергії, переданої за час інтеграції, ΔQ :

$$\Delta Q = mc\Delta T$$

де m – маса; c – питома теплоємність матеріалу.

Для того щоб отримати зміну температури:

$$\Delta T = \frac{\Delta Q}{mc}$$

$$\frac{[\text{Дж}]}{[\text{кг}] \cdot \left[\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}\right]} = \frac{[\text{Дж}]}{[\text{кг}]} \div \frac{[\text{Дж}]}{\left[\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}\right]} = [\text{К}]$$

Потім до зміни температури ΔT додається початкова температура $T_{1(0)}$. Таким чином отримується температура сторони.

Електрична система – реалізує закон Ома, закон Джоуля-Ленца, ефект Зеебека. Спочатку від вхідної напруги віднімається термоЕРС:

$$U^+ - \Delta T \cdot \alpha$$

де U^+ – вхідна напруга; ΔT – різниця температур сторін; α – коефіцієнт Зеебека

$$[\text{В}] - [\text{К}] \cdot \left[\frac{\text{В}}{\text{К}}\right] = [\text{В}]$$

За отриманою напругою розраховуємо струм. R_1 та R_2 – це опори різних сторін, які будуть нагрівати сторони джоулевим теплом

$$\frac{U}{(R_1 + R_2)}$$

$$\frac{[\text{В}]}{[\text{Ом}]} = [\text{А}]$$

Потужність резистивного нагрівання для обох сторін:

$$P_1 = I^2 \cdot R_1; \quad P_2 = I^2 \cdot R_2$$

$$[A^2] \cdot \left[\frac{B}{A} \right] = [A] \cdot [B] = [BT]$$

На рисунку 2.2 можна побачити як була додана електрична система до візуально-блочної моделі.

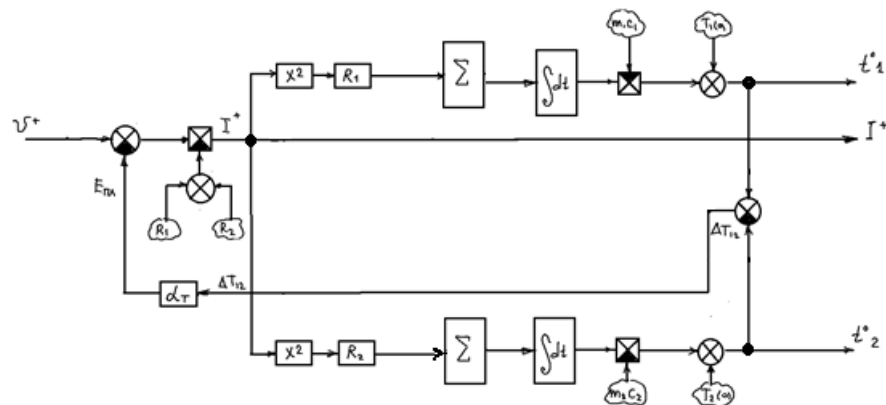


Рисунок 2.2 – Візуально-блочна модель з електричною системою

Термічний опір середовище-сторона враховує витік потужності до навколишнього середовища через термічні опори R_{01} та R_{02} .

$$\frac{t_1^{\circ} - t_0^{\circ}}{R_{01}}, \frac{t_2^{\circ} - t_0^{\circ}}{R_{02}},$$

де t_0° – температура навколишнього середовища; t_1° – температура гарячої сторони; t_2° – температура холодної сторони. R_{01} – термічний опір середовище-гаряча сторона; R_{02} – термічний опір середовище-холодна сторона.

$$\frac{[K]}{[K/BT]} = [K] \cdot \frac{[BT]}{[K]} = [BT]$$

На рисунку 2.3 можна побачити, як був доданий термічний опір середовище-сторона до візуально-блочної моделі.

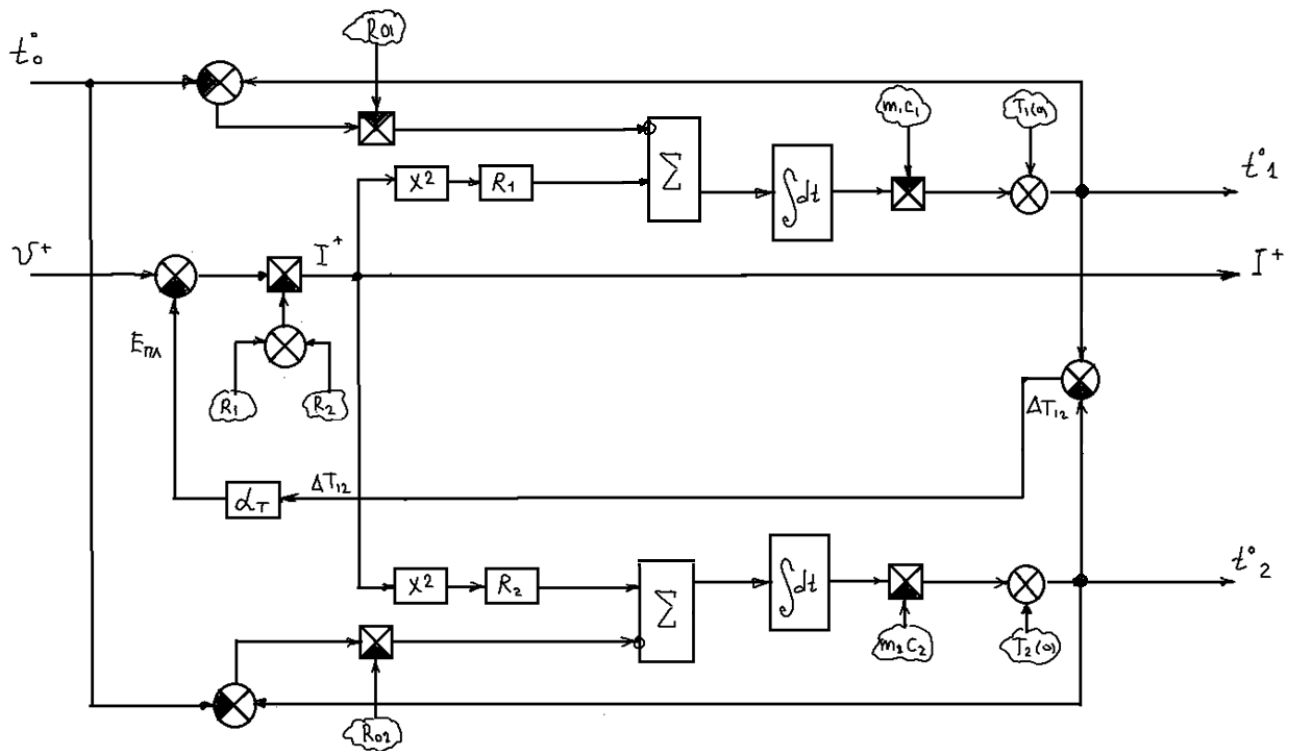


Рисунок 2.3 – Візуально-блочна модель з термічним опором між середовищем та сторонами

Термічний опір між гарячою та холодною сторонами враховує витік потужності між сторонами крізь термічний опір R_{12}

$$\frac{t_1^{\circ} - t_2^{\circ}}{R_{12}}$$

$$\frac{[\text{K}]}{[\text{K/Вт}]} = [\text{K}] \cdot \frac{[\text{Вт}]}{[\text{K}]} = [\text{Вт}]$$

На рисунку 2.4 можна побачити як був доданий термічний опір сторона-сторона до візуально-блочної моделі.

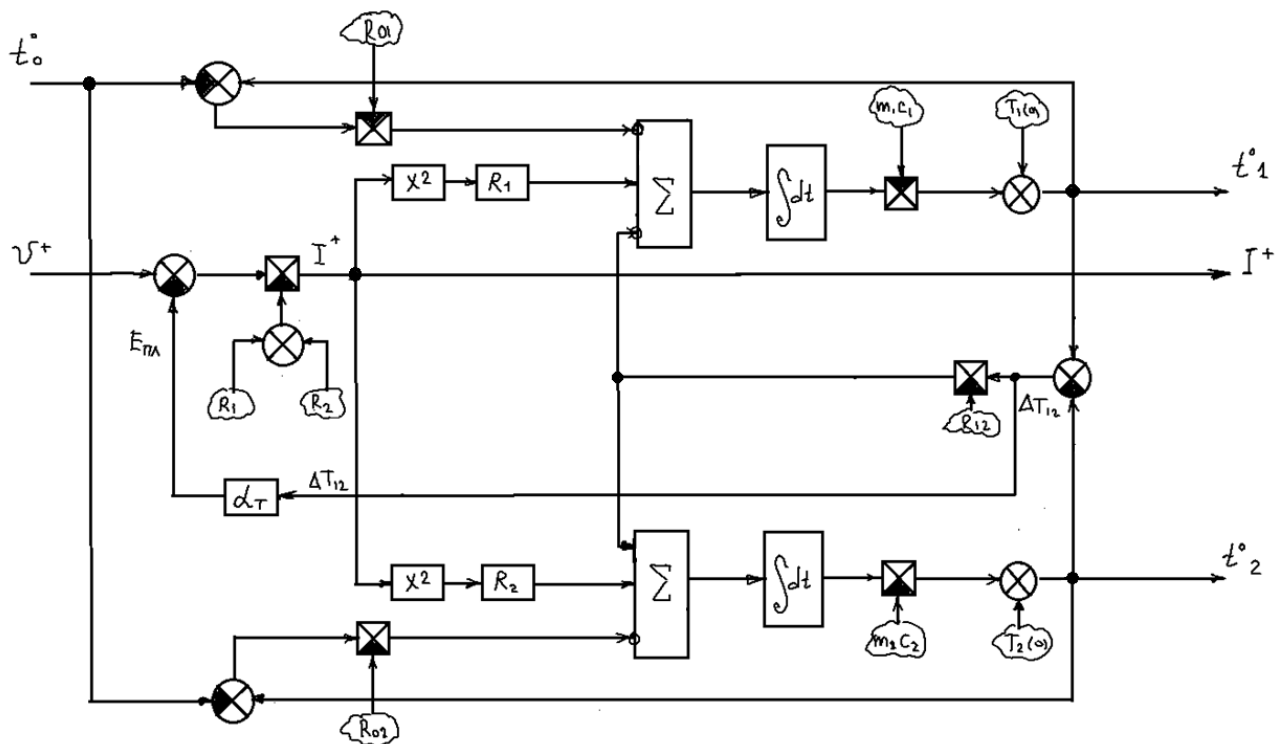


Рисунок 2.4 – Візуально-блочна модель з доданням термічного опору між гарячою та холодною сторонами

Потужність виділення чи поглинання тепла за ефектом Пельтьє:

$$Q_h = \alpha \cdot T_1 \cdot I; Q_c = \alpha \cdot T_2 \cdot I$$

де Q_h – потужність гарячої сторони; T_1 – абсолютна температура гарячої сторони; I – електричний струм; Q_c – потужність холодної сторони; T_2 – абсолютна температура холодної сторони.

$$\left[\frac{B}{K} \right] \cdot [K] \cdot [A] = [B] \cdot [A] = [BT]$$

На рисунку 2.5 можна побачити як до візуально-блочної моделі було додано потужність за ефектом Пельтьє. У моделі від температур t_1^o, t_2^o віднімається 273,15, таким чином ми отримуємо абсолютну температуру в кельвінах.

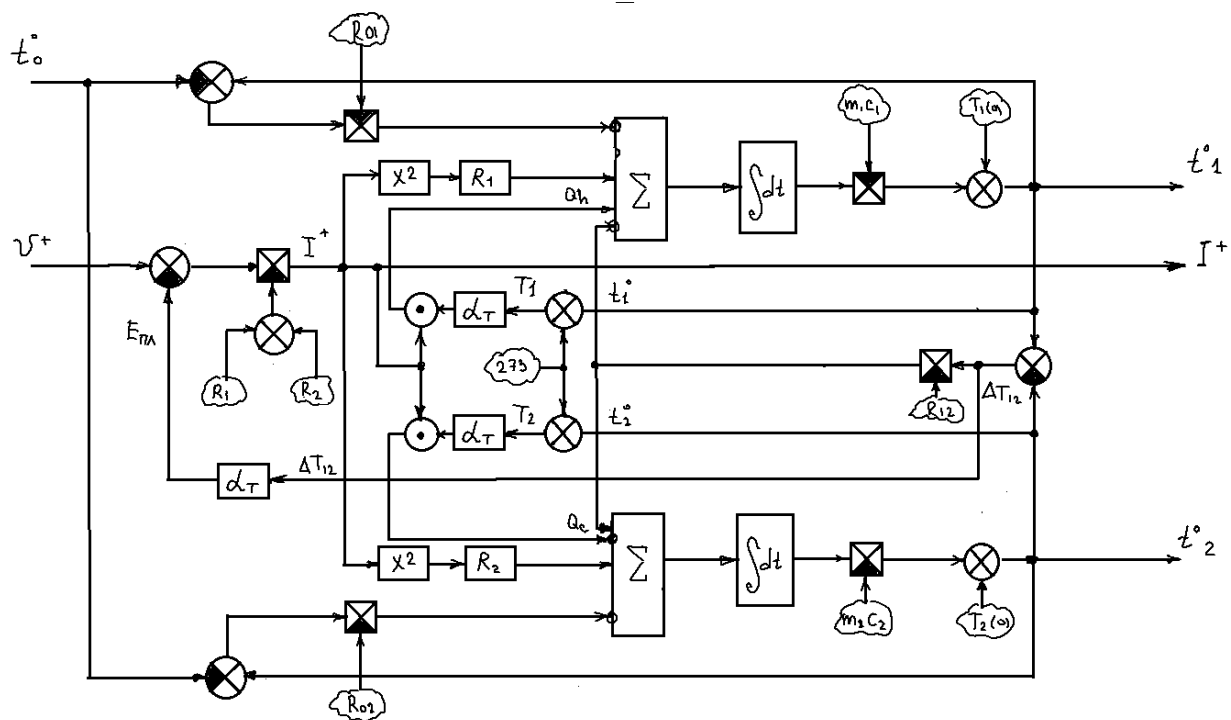


Рисунок 2.5 – Візуально-блочна модель з доданням потужності ефекту Пельтьє

Також до моделі були додані входи потужності до кожної зі сторін, P_1 та P_2 , використовуючи які можна додати теплове навантаження до однієї чи обох сторін. На рисунку 2.6 можна побачити вигляд візуально-блочної моделі з доданими входами потужності.

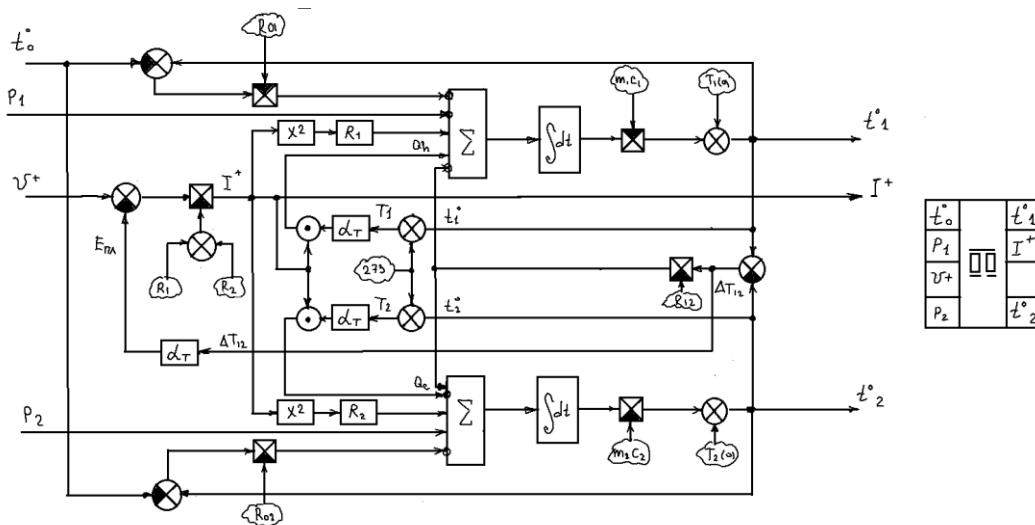


Рисунок 2.6 – Візуально-блочна модель з доданням входів потужності

P_1 – вхід потужності гарячої сторони, ця потужність віднімається від суми потужностей. Цей вхід використовується для навантаження на гарячу сторону, яке є більш складним ніж простий термічний опір сторона-середовище, наприклад радіатор з теплоємністю. P_2 – вхід потужності холодної сторони, ця потужність додається до суми потужностей. Цей вхід використовується для навантаження на холодну сторону яке є більш складним ніж простий термічний опір сторона-середовище, наприклад радіатор з теплоємністю.

Температурний коефіцієнт опору. Під час перевірки адекватності моделі були помічені відхилення від експериментальних результатів. Причиною цього був температурний коефіцієнт опору (ТКО) елемента Пельтьє.

Опір від температури розраховується за формулою:

$$R_1 = R_0 \cdot (1 + \alpha_R(T_1 - T_0))$$

де R_1 – опір при температурі T_1 ; R_0 – опір при температурі T_0 ; α_R – температурний коефіцієнт опору; T_1 – температура для значення опору R_1 ; T_0 – температура для значення опору R_0 ;

$$[0\text{м}] \cdot \left(\left[\frac{1}{\text{К}} \right] \cdot [\text{К}] \right) = [0\text{м}]$$

На рисунку 2.7 можна побачити остаточний вид блок схеми моделі.

Підсумовуючи, модель має чотири входи, де t_0° – температура оточуючого середовища, P_1 – вхід потужності гарячої сторони, P_2 – вхід потужності холодної сторони, U^+ – вхідна напруга. Та три виходи, де t_1° – температура гарячої сторони, t_2° – температура холодної сторони, I^+ – вхідний струм.

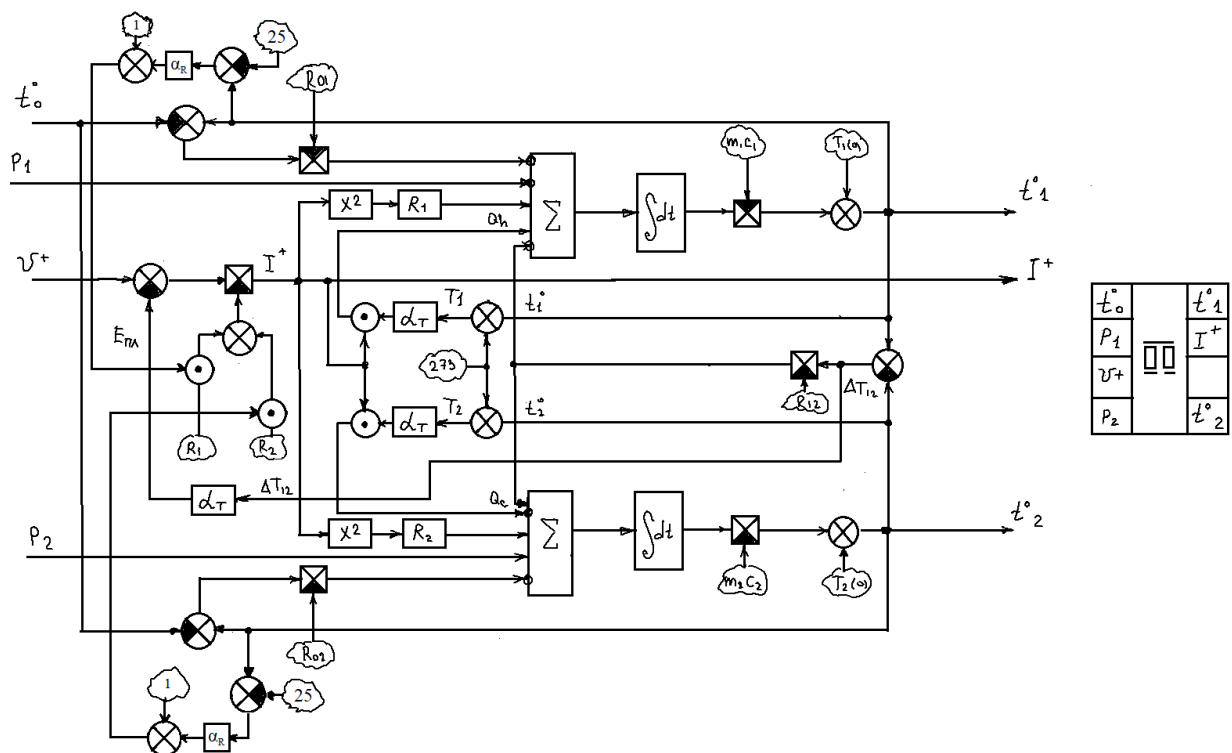


Рисунок 2.7 – Візуально-блочна модель елемента Пельтьє

2.2 Модель радіатора гарячої сторони

Для подальшого моделювання була створена модель радіатора гарячої сторони, яка враховує термічний опір сторона-радіатор, термічний опір радіатор-середовище, та теплоємність радіатора. На рисунку 2.8 можна побачити візуально-блочну модель радіатора гарячої сторони.

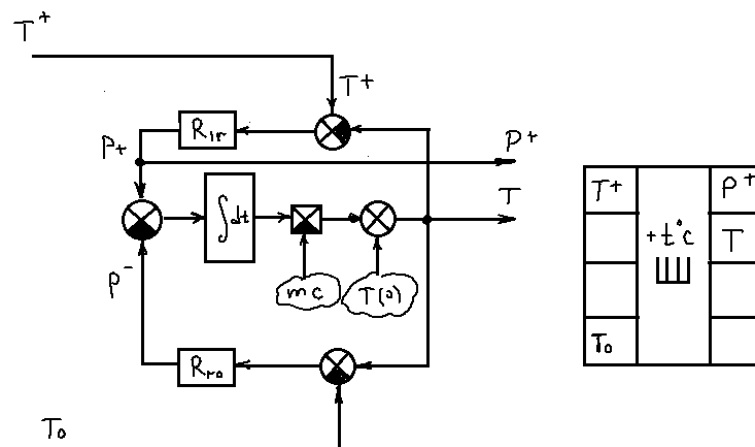


Рисунок 2.8 – Візуально-блочна модель радіатора гарячої сторони

Модель має два входи: T^+ – температура об'єкту, що охолоджується об'єкту та T_0 – температура навколишнього середовища. Модель має два виходи: P^+ – потужність охолодження та T – температура радіатора. Модель складається з теплоємності та двох термічних опорів, конструкція яких аналогічна до аналогічних елементів у моделі елементу Пельтьє.

2.3 Модель радіатора холодної сторони

Також була створена аналогічна модель радіатора холодної сторони. Візуально-блочну модель радіатора холодної сторони можна побачити на рисунку 2.9.

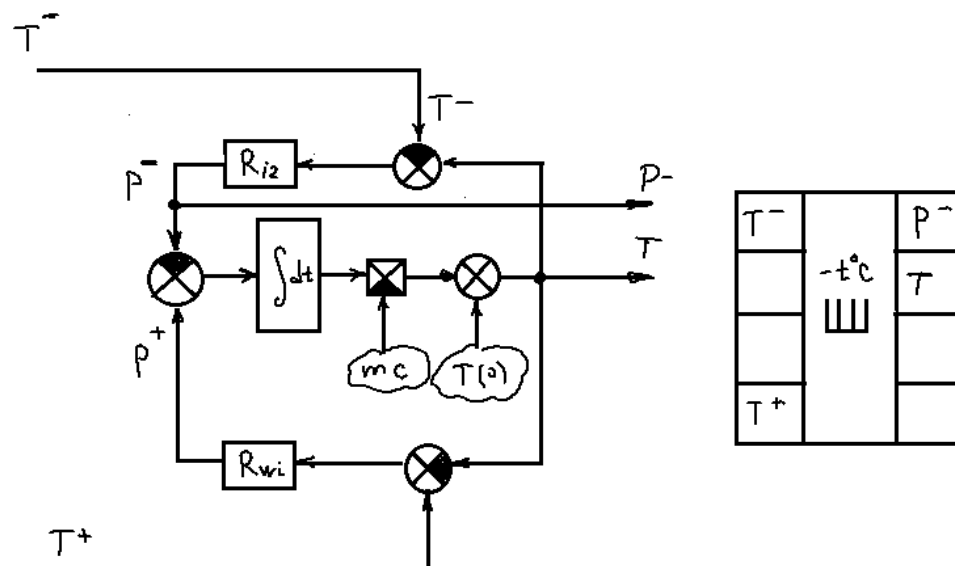


Рисунок 2.9 – Візуально-блочна модель радіатора холодної сторони

Модель має два входи: T^+ – температура об'єкту, що охолоджується та T_0 – температура навколишнього середовища. Модель має два виходи: P^+ – потужність охолодження та T – температура радіатора.

2.4 Модель джерела живлення

Модель джерела живлення реалізує джерело напруги з внутрішнім опором. Візуально блочну модель джерела живлення можна побачити на рисунку 2.10.

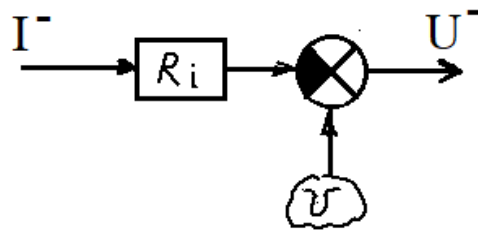


Рисунок 2.10 – Візуально-блочна модель джерела живлення

Джерело живлення має вхід I^- – вихідний струм та вихід U^- – вихідна напруга.

2.5 Зборка моделі

На рисунку 2.11 можна побачити як були поєднані блоки моделей.

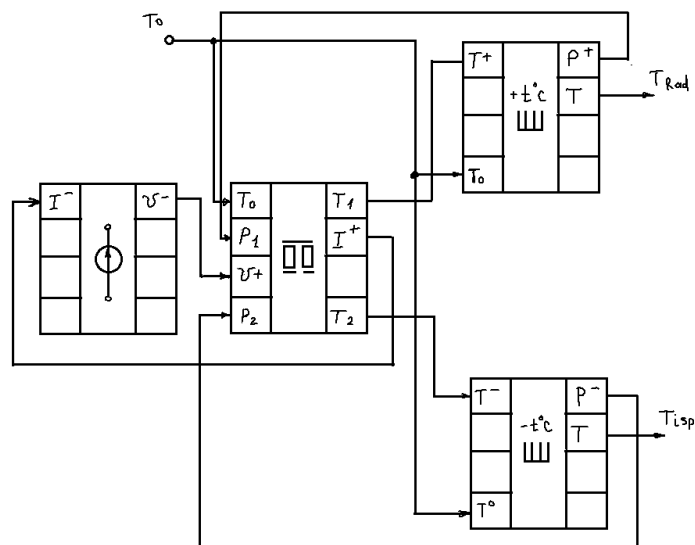


Рисунок 2.11 – Візуально-блочна модель холодильника на основі елементу
Пельтьє

Загальна модель холодильника має вхід температури навколишнього середовища T_0 , та виходи температури на радіаторах гарячої та холодної сторони.

3 МОДЕЛЮВАННЯ ПРИСТРОЮ НА БАЗІ ЕЛЕМЕНТА ПЕЛЬТЬЄ

3.1 Реалізація моделі елемента Пельтьє у середовищі MATLAB

На рисунку 3.1 можна побачити реалізацію моделі елемента Пельтьє у середовищі MATLAB

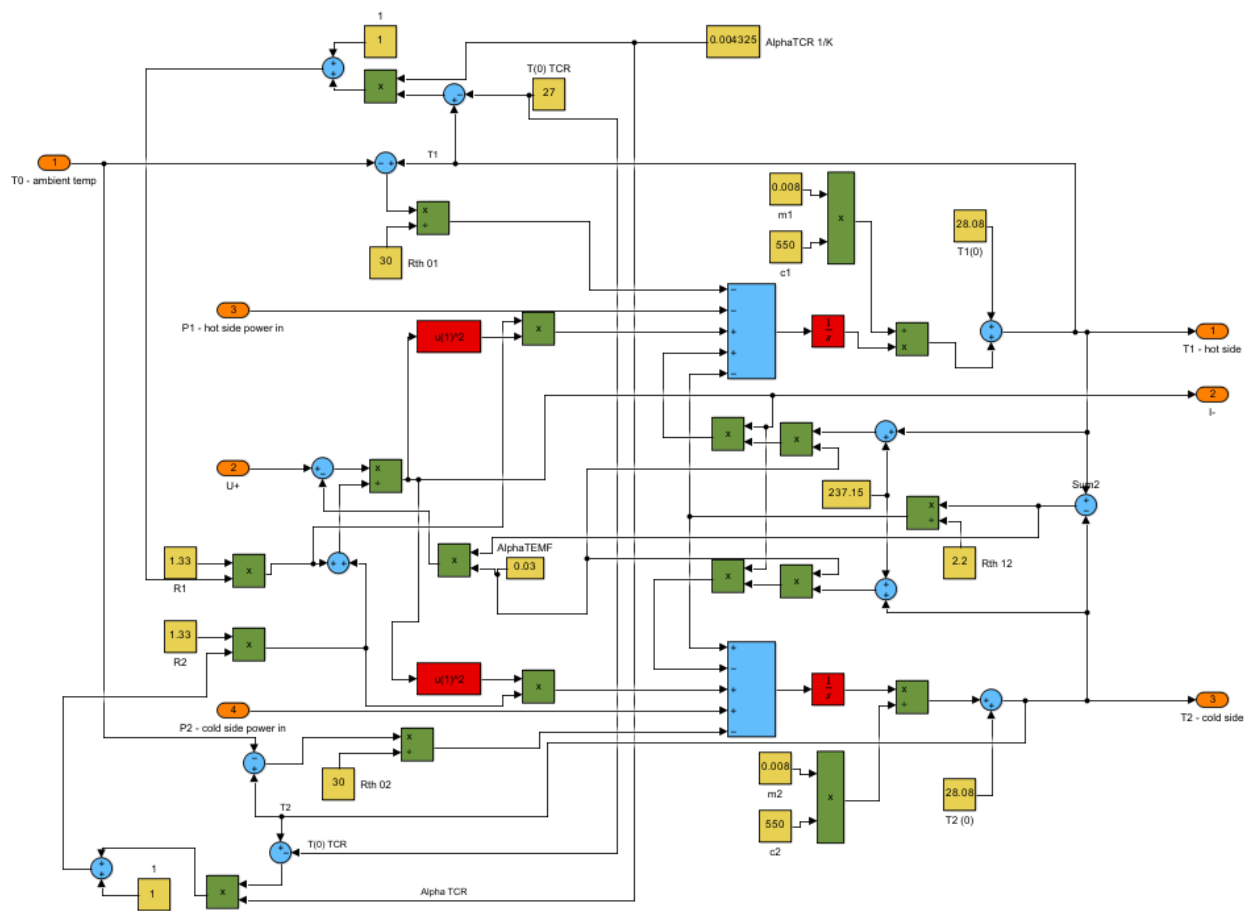


Рисунок 3.1 – Реалізація моделі елемента Пельтьє у MATLAB

Константи позначені жовтим кольором, суматори – блакитним, блоки множення та ділення – зеленим, інші функціональні блоки – червоним, входи та виходи – оранжевим.

3.2 Перевірка адекватності моделі експериментом

Для перевірки адекватності моделі був складений експеримент з метою порівняння експериментальних даних з результатами моделювання.

Тестовий стенд включав до себе комерційний елемент Пельтьє типу TEC1-12706 що містить 127 послідовних термопар та розрахований на максимальний струм 6 А, тонкоплівковий термоперетворювач опору характеристики RT1000 класу 2В ($\pm 0,6\%$), реєструючий вольтметр HP 3478A під'єднаний до комп'ютера та джерело постійного струму Б5-44А.

Елемент Пельтьє був підвішений на дротах у вертикальному положенні. Елемент Пельтьє був під'єднаний до джерела постійного струму, що було встановлено у режим стабілізації струму, на значенні 1,02735 А. Експеримент було повторено три рази, перший раз записувалась температура гарячої сторони, другий – температура холодної сторони, третій – напруга на виході джерела струму. Виміри робилися реєструючим вольтметром HP 3478A класу точності 0,01 та передавалися на комп'ютер інтерфейсом GPIB. Вольтметр робив вибірки з частотою 30 Гц. Датчик температури вимірювався за чотирипровідною схемою зі струмом крізь датчик 1 мА. Датчик температури контактував з елементом Пельтьє крізь шар термопасти, він прижимався вручну пластиною що давала рівномірний притиск. Проте спостерігались випадки погіршення контакту, через це у деяких точках можна побачити стрибки температури.

Перехідний процес температури гарячої та холодної сторони отриманий шляхом експерименту можна побачити на рисунку 3.2. Видно як спочатку сторони розвивають різницю температур між собою, а потім разом нагріваються, підтримуючи різницю температур. Спостерігаються стрибки температури спричинені поганим термічним контактом датчику.

Перехідний процес напруги на виході джерела струму можна побачити на рисунку 3.3. Так як джерело струму підтримує струм незмінним, при появі термоЕРС чи зростанні опору, вихідна напруга джерела струму збільшиться.

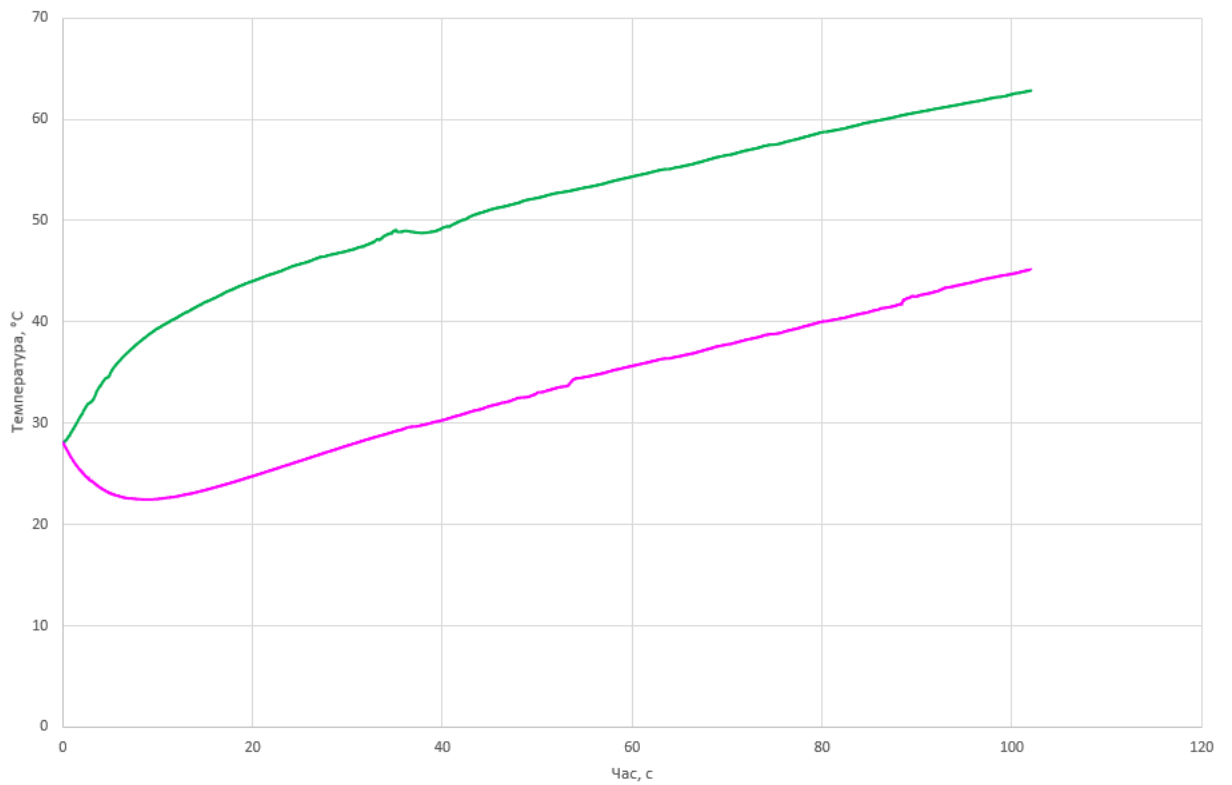


Рисунок 3.2 – Перехідний процес температури гарячої та холодної сторони отриманий експериментальним шляхом

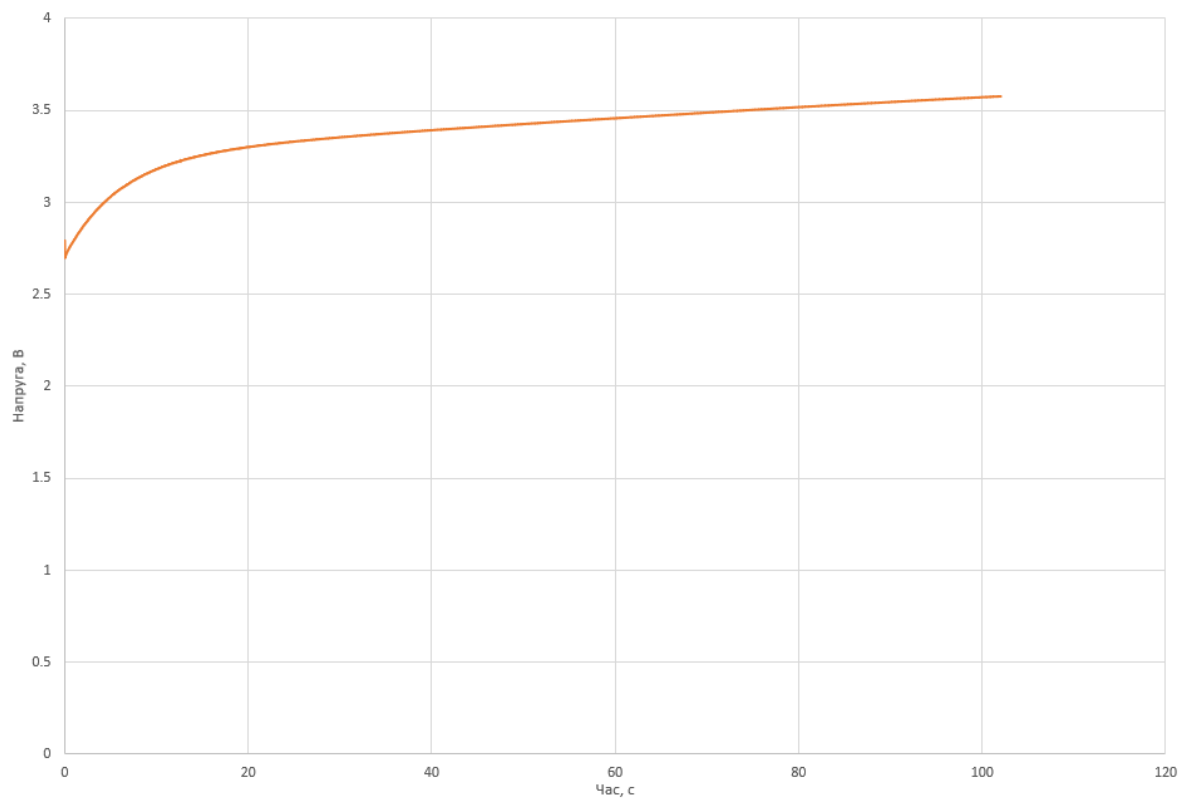


Рисунок 3.3 – Перехідний процес напруги на виході джерела струму отриманий експериментальним шляхом

На рисунку 3.3 зріст напруги у перші 15 секунд спричинений появою різниці температур між сторонами, що, у свою чергу, створює термоЕРС за ефектом Зеебека. Лінійний зріст після перших 15 секунд спричинений термальним коефіцієнтом опору елемента Пельтьє.

Для того щоб оцінити результати моделювання потрібно повторити експеримент у середовищі моделювання. Це потребує значень вхідних констант моделі: коефіцієнт Зеебека α , опір елемента Пельтьє R , термічний опір між сторонами R_{12} , термічний опір середовище-сторона R_{01} та R_{02} , маса та питома теплоємність m , температурний коефіцієнт опору α_R , температура оточуючого середовища t_0° , початкові температури сторін t_1° та t_2° . Деякі з цих значень можна легко виміряти чи порахувати.

Електричний опір елемента Пельтьє можна виміряти якщо використовувати джерело низькочастотного (>1 кГц) змінного струму. Вимір на постійному струмі не є оптимальним так як будь який струм крізь елемент Пельтьє спричинить різницю температур, що у свою чергу спричинить термоЕРС, що з'явиться як похибка при вимірюванні. Опір досліджуемого елемента Пельтьє TEC1-12706 склав 2,66 Ом.

Температурний коефіцієнт опору α_R можна отримати з рисунків 3.2, 3.3: оберемо точки у 40 та 100 секунд. Розрахуємо середню температуру сторін у цей час:

$$t_{40} = \frac{49,3 + 30,3}{2} = 39,8 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

$$t_{100} = \frac{62,5 + 44,7}{2} = 53,6 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

Розрахуємо опір елемента Пельтьє у цих точках:

$$R_{40} = \frac{V_{40}}{I_{40}} = \frac{3,392}{1,02735} = 3,301 \text{ (Ом)}$$

$$R_{100} = \frac{V_{100}}{I_{100}} = \frac{3,572}{1,02735} = 3,477 \text{ (Ом)}$$

Розрахуємо ТКО елемента Пельтьє:

$$\alpha_R = \frac{\left(\frac{R_{100}}{R_{40}} - 1\right)}{t_{100} - t_{40}} = \frac{\left(\frac{3,477}{3,301} - 1\right)}{53,6 - 39,8} = 0,003864 \left(\frac{1}{K}\right) = 0.3864 \left(\frac{\%}{K}\right)$$

Дані для розрахунку ТКО також можна отримати з технічної документації. Зазвичай зазначають опір при 27 °С та 50 °С. Розрахований на основі даних технічної документації ТКО знаходився у діапазоні 0,35...0,5 ($\frac{\%}{K}$). Це добре збігається з результатом розрахунку основанийого на експериментальних даних.

Коефіцієнт Зеебека α можна отримати з рисунку 3.2 та 3.3. Розглянемо приріст напруги та розвинену різницю температур за перші 15 секунд, віднімемо додаткову напругу спричинену зміною опору від температури:

$$\alpha = \frac{\Delta V - \Delta V_{TCR}}{\Delta T}$$

$$\Delta V_{TCR} = I \cdot (R_0 \cdot (1 + \alpha_R(T_1 - T_0)) - R_0)$$

$$\Delta V_{TCR} = 1,02735(2,626 \cdot (1 + 0,003864(32,66 - 28,08)) - 2,626)$$

$$\Delta V_{TCR} = 1,02735(2,672 - 2,626) = 0.047$$

$$\alpha = \frac{0,5575 - 0,047}{18,55} = 0,0275$$

У [7, 8, 9] є методика розрахунку α з даних технічної документації. За цим методом було отримано значення 0,045, що майже у два рази більше експериментального значення.

Термічний опір сторона-сторона R_{12} був розрахований за [7, 9]:

$$R_{12} = \frac{\Delta T_{\max}}{I_{\max} \cdot V_{\max}} \cdot \frac{2T_1}{(T_1 - \Delta T_{\max})}$$

$$R_{12} = \frac{71}{6 \cdot 14} \cdot \frac{2 \cdot 300_1}{(300 - 71)} = 2,21 \left(\frac{\text{K}}{\text{Вт}} \right)$$

Теплоємність сторін елемента Пельтьє можна розрахувати з його фізичних властивостей:

$$mc,$$

де m – маса; c – питома теплоємність.

Але елемент Пельтьє складається з кераміки Al_2O_3 і телуриду вісмуту Bi_2Te_3 які мають різну питому теплоємність (880 Дж/(кг·К) та 220 Дж/(кг·К) відповідно). Пропорція мас цих матеріалів не відома, через це ми не можемо розрахувати точну теплоємність. Візьмемо середнє значення теплоємностей матеріалів для вхідних даних.

$$m = 0,008 \text{ кг}$$

$$c = 550 \text{ Дж/(кг·К)}$$

Термічний опір не можна порахувати не знаючи точно теплоємність. Зробимо експертну оцінку, що термічний опір елемента Пельтьє вертикально підвішеного у повітрі складає 30 К/Вт.

Початкова температура сторін та температура навколишнього середовища обрані такі самі як у експерименті, 28 °С та 23 °С відповідно.

Отримані вхідні дані були застосовані для того щоб отримати перехідні процеси температури на рисунку 3.4 та напруги на рисунку 3.5.

На рисунку 3.4 зеленим позначена температура гарячої сторони експерименту, червоною лінією – температура гарячої сторони моделювання, червоною пунктирною – температура гарячої сторони моделювання без урахування ТКО, пурпуровою – температура холодної сторони експерименту, синьою – температура холодної сторони моделювання, синьою пунктирною – температура холодної сторони моделювання без урахування ТКО.

На рисунку 3.5 – оранжева лінія результат експерименту, синя – моделювання, синя пунктирна – моделювання без урахування ТКО.

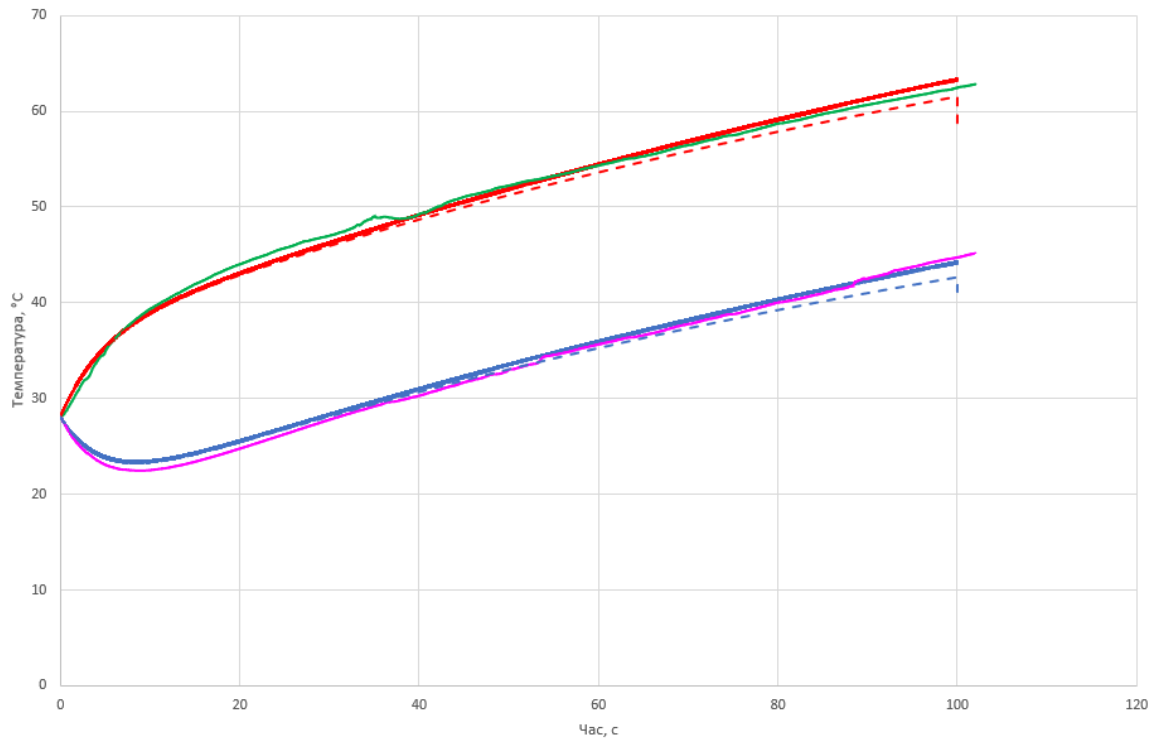


Рисунок 3.4 – Перехідний процес температури

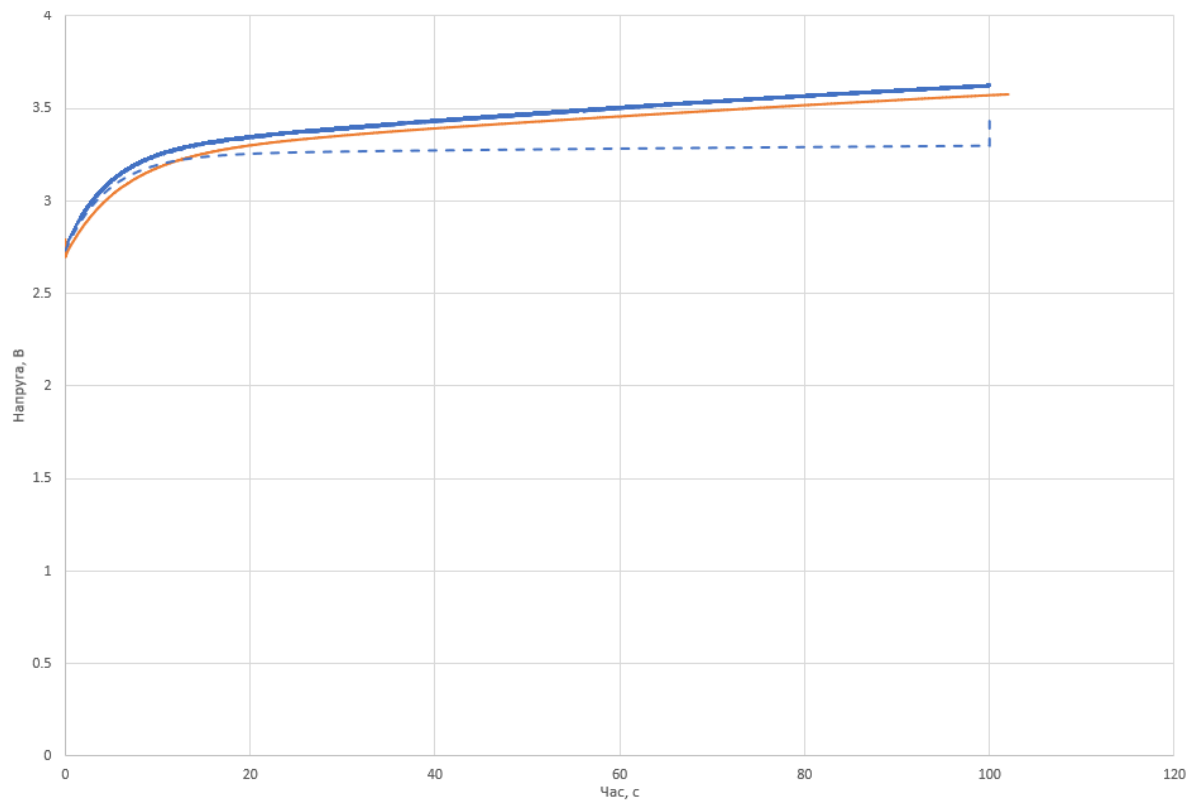


Рисунок 3.5 – Перехідний процес напруги

На рисунку 3.4 видно що модель гарно співпадає з результатами експерименту. Це є добрим результатом для попередніх наближених розрахунків. На рисунку 3.5 також гарно співпадає результат моделювання з експериментом. Різниця між експериментальним результатом та моделюванням менше ніж 5%.

На рисунках пунктирною лінією позначена модель у якій не врахований ТКО елемента Пельтьє, зі збільшенням відхилення температури від початкового значення спостерігається зростання похибки цієї моделі. Таким чином врахування ТКО елемента Пельтьє робить модель більш адекватною при значних змінах температури.

3.3 Результати моделювання

Для демонстрації моделі було проведене моделювання простого охолоджувача. Візуально-блочна модель з рисунку 2.11 була реалізована у MATLAB, що можна побачити на рисунку 3.6

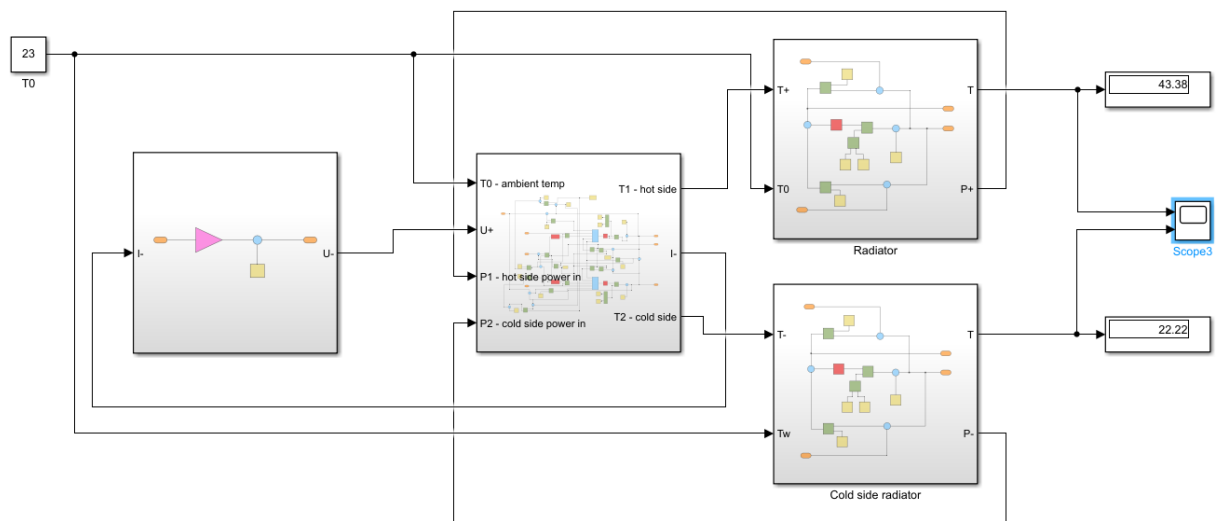


Рисунок 3.6 – Візуально-блочна модель охолоджувача

Джерело живлення має напругу 6 В, внутрішній опір 0,2 Ом. Радіатор холодної сторони має термічний опір охолоджуючий об'єкт-радіатор $1 \frac{\text{K}}{\text{Вт}}$, термічний опір радіатор-середовище $100 \frac{\text{K}}{\text{Вт}}$, радіатор виготовлений з алюмінію

та важить 50 г. Радіатор гарячої сторони має термічний опір охолоджуваний об'єкт-радіатор $0,05 \frac{\text{K}}{\text{Вт}}$, термічний опір радіатор-середовище $2 \frac{\text{K}}{\text{Вт}}$, радіатор виготовлений з алюмінію та важить 300 г. Модель елемента Пельтьє має вхідні значення аналогічні значенням підрозділу 3.2. Результати моделювання – температури на радіаторі гарячої сторони та холодної сторони можна побачити на рисунку 3.7.



Рисунок 3.7 – Температури радіаторів гарячої та холодної сторони охолоджувача.

На рисунку 3.7 видно, що після включення живлення температура холодної сторони починає швидко знижуватись завдяки ефекту Пельтьє, а температура гарячої сторони відповідно зростає через відведення тепла на радіатор. У міру наближення до усталеного стану температури обох сторін стабілізуються: сторони разом нагріваються через джоулеве нагрівання, та тримають різницю температур. Можна помітити, що теплова інерція системи, зумовлена масою радіаторів та їхньою теплоємністю, суттєво впливає на тривалість перехідного процесу.

ВИСНОВКИ

У даній роботі були досліджені елементи Пельтьє. Виконано аналіз фізичних принципів роботи елементів Пельтьє, їхньої будови та основних сфер застосування. На основі проведеного аналізу розроблено математичну модель охолоджувача, яка включає в себе модель елемента Пельтьє, моделі гарячого та холодного радіаторів, а також джерела живлення. Створена модель є адекватною з точки зору сучасного рівня знань у галузі термоелектричних пристроїв і враховує фізичні ефекти, такі як термоелектричний ефект Пельтьє, ефект Зеебека та температурну залежність електричного опору елемента.

У середовищі MATLAB реалізовано візуально-блочну модель елемента Пельтьє. Проведена перевірка адекватності моделі шляхом порівняння результатів моделювання з експериментальними даними показала гарну відповідність – похибка не перевищувала 5%. Це свідчить про високу якість розробленої моделі та її придатність для використання в інженерних задачах.

Результати роботи можуть бути впроваджені у практичні системи охолодження та термостатування. Зокрема охолодження повітря в озонаторах та інших приладах, де потрібна компактна система охолодження.

Крім того, у процесі дослідження було розроблено просту методику проведення експериментальних вимірювань для визначення ключових параметрів елемента Пельтьє.

Науково-технічну значущість роботи складає те, що розроблена модель враховує температурний коефіцієнт опору елемента Пельтьє, що відрізняє її від аналогів, так як у науково-технічній літературі не вдалося знайти моделей, які б враховували цей ефект [7, 8, 9, 10].

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на розробці методики розрахунку основних параметрів термоелектричних модулів та розробці методики використання розробленої моделі.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Julian H. G. The physics of thermoelectric energy conversion. Morgan & Claypool, 2017
2. Kazuaki Y., Je-Hyeong B., Ali S. Thermoelectric Energy Conversion Devices and Systems. World Scientific, 2021
3. D.M. Rowe Thermoelectrics handbook macro to nano. Taylor & Francis, 2006
4. Tamer G., Erdem C. TECs from theory to practice. Journal of electronic materials, 2018
5. Ryoji F. Thermoelectric energy conversion theories and mechanisms, materials, devices, and applications. Woodhead Publishing, 2021
6. Diana D. P., Alireza R. Thermoelectric energy conversion, basic concepts and device applications, Wiley-VCH, 2017
7. Simon L. Sam B. Y. Modeling and Analysis of Thermoelectric Modules. IEEE Transactions on industry applications, 2007.
8. Simon L. Sam B. Y. Analysis of Thermoelectric Coolers by a Spice-Compatible Equivalent-Circuit Model. IEEE Power electronics letters, 2005
9. Chakib A. Peltier Thermoelectric Modules Modeling and Evaluation. International journal of engineering, 2011.
10. Chávez J. A., Ortega J. A., Salazar J., Turó A., García M. J. SPICE Model of Thermoelectric Elements Including Thermal Effects