

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ,  
ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТА ТРАНСПОРТНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

Кафедра електричного транспорту

**ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ СИЛОВОЇ  
ЕЛЕКТРОНІКИ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ**

**Бакалаврська кваліфікаційна робота**

**Здобувач:**

Олег КАМНЄВ

гр. ЕТ 2022-1

**Керівник:**

Анатолій КУЗНЕЦОВ

доцент, к.т.н.


Харків – 2026

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА  
імені О. М. Бекетова

Навчально-науковий інститут енергетичної, інформаційної та транспортної інфраструктури  
Кафедра електричного транспорту  
Освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавр  
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
Освітньо-професійна програма Електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ЕТ

 Микола ХВОРОСТ  
\_\_\_\_\_ 2026 р.

**З А В Д А Н Н Я**  
**до бакалаврської кваліфікаційної роботи**

Камнєв Олег Олексійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. **Тема роботи: Дослідження теплових режимів роботи силової електроніки електромобіля**

кваліфікаційної роботи Кузнецов Анатолій Іванович, доцент, к.т.н.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом університету від 22.05.2026 №440-03

2. Строк подання бакалаврської кваліфікаційної роботи 15.06.2026 р.

3. **Вихідні дані до бакалаврської роботи** Матеріали переддипломної практики, дані по надійності та працездатності основних вузлів електротранспорту, літературні джерела з експлуатації, обслуговуванню та ремонту електротранспорту.

4. **Зміст бакалаврської кваліфікаційної роботи :**

1. Аналіз силової електроніки електромобіля та умов її теплового навантаження.

2. Розробка моделі та методики дослідження теплових режимів силової електроніки.




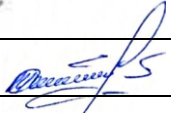
3. Дослідження теплових режимів та оцінка ефективності роботи силової електроніки.

4. Охорона праці.

5. **Перелік графічного матеріалу:** Актуальність дослідження, мета та практична значущість. Силова електроніка електромобіля як об'єкт теплового дослідження. Об'єкт дослідження та вихідні параметри моделі. Спрощена математична та теплова модель силового модуля. Методика дослідження. Реалізація моделі в MATLAB/Simulink. Дослідження теплових режимів у

номінальному та змінному навантаженні. Вплив параметрів охолодження та порівняння режимів роботи. Охорона праці при дослідженні силової електроніки електромобіля. Висновки.

#### 6. Консультанти розділів бакалаврської кваліфікаційної роботи

Розділ	Ім'я, прізвище та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Основна частина	Анатолій КУЗНЕЦОВ, доцент		
Антиплагіат	Вікторія ЛЕВЧЕНКО, інженер		
Нормоконтроль	Вячеслав ШАВКУН, доцент		

7. Дата видачі завдання 11.05.2026 р.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Стан питання	11.05 – 23.05.2026	
2	Розділи 1, 2	18.05 – 30.05.2026	
3	Розділи 3, 4	25.05 – 06.06.2026	
4	Охорона праці та БНС	01.06 – 13.06.2026	
5	Оформлення паперового та електронного варіантів роботи	08.06 – 13.06.2026	
6	Підготовка доповіді та презентації	08.06 – 13.06.2026	

Здобувач



(підпис)

Олег КАМНЄВ

(ім'я, прізвище)

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи



(підпис)

Анатолій КУЗНЕЦОВ

(ім'я, прізвище)

## АНОТАЦІЯ

У бакалаврській кваліфікаційній роботі досліджено теплові режими роботи силової електроніки електромобіля на прикладі тягового інвертора Nissan LEAF 40 kWh.

У першому розділі проаналізовано роль силової електроніки в структурі електромобіля, умови її теплового навантаження та основні фактори перегріву силових модулів.

У другому розділі обґрунтовано вибір об'єкта дослідження, розроблено спрощену електротеплову модель силового модуля тягового інвертора та методику оцінювання його температурного стану.

У третьому розділі виконано розрахунок і порівняльний аналіз теплових режимів у номінальних, перевантажувальних і змінних умовах роботи, а також визначено вплив охолодження та температури довкілля на температуру переходу.

У четвертому розділі проаналізовано небезпечні й шкідливі виробничі фактори під час дослідження силової електроніки електромобіля та запропоновано заходи з охорони праці, зокрема розраховано необхідний повітрообмін лабораторного приміщення.

У роботі встановлено, що найбільш термічно напруженими є режими перевантаження, підвищеної температури довкілля та погіршеного охолодження. Практичне значення роботи полягає у можливості використання запропонованого підходу для оцінювання теплонапруженості силових модулів і обґрунтування вимог до систем охолодження електромобілів.

**Ключові слова:** електромобіль, силова електроніка, тяговий інвертор, тепловий режим, силовий модуль, температура переходу, система охолодження.

**Пояснювальна записка містить:**  
сторінок – 67, таблиць – 5, рисунків – 10, графічна частина складається з 12 аркушів презентаційного матеріалу.

## ЗМІСТ

	Стор.
ВСТУП.....	7
1 АНАЛІЗ СИЛОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ ТА УМОВ ЇЇ ТЕПЛОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ.....	10
1.1 Роль силової електроніки в електромобілі.....	10
1.2 Конструктивні та функціональні особливості силових напівпровідникових модулів .....	11
1.3 Теплові режими роботи силової електроніки електромобіля .....	13
1.4 Основні фактори, що визначають перегрів силової електроніки .....	14
1.5 Аналіз сучасних методів дослідження й контролю теплових режимів .	16
1.6 Постановка задач дослідження.....	18
2 РОЗРОБКА МОДЕЛІ ТА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВИХ РЕЖИМІВ СИЛОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ .....	21
2.1 Вибір об'єкта дослідження та вихідних параметрів .....	21
2.2 Математичний опис теплових процесів у силових елементах.....	23
2.3 Методика розрахунку температурних режимів.....	26
2.4 Розробка структури дослідної або комп'ютерної моделі .....	29
2.4.1 Розробка структури комп'ютерної моделі.....	33
2.5 Критерії оцінки ефективності теплового режиму .....	36
Висновки до розділу 2 .....	40
3 ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВИХ РЕЖИМІВ ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ СИЛОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ .....	41
3.1 Дослідження теплового стану в номінальному режимі роботи.....	41
3.2 Аналіз теплових режимів при змінному навантаженні .....	43
3.3 Вплив параметрів охолодження на тепловий режим .....	45

3.4 Порівняльна оцінка теплових режимів за різних умов експлуатації .....	48
3.5 Рекомендації щодо підвищення теплової надійності силової електроніки електромобіля.....	49
4 ОХОРОНА ПРАЦІ .....	52
4.1 Вступ .....	52
4.2 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів при дослідженні та обслуговуванні силової електроніки електромобіля .....	53
4.3 Вимоги безпеки при роботі з електронними та силовими електротехнічними установками.....	55
4.4 Заходи щодо забезпечення безпечних умов праці під час експериментальних або лабораторних досліджень.....	56
4.5 Розрахунок та оцінка окремих заходів охорони праці.....	57
ВИСНОВКИ.....	61
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	64

## ВСТУП

Сучасний розвиток електромобільного транспорту супроводжується постійним зростанням вимог до енергоефективності, надійності та безпечності його основних функціональних вузлів. Одне з ключових місць у структурі електромобіля посідає силова електроніка, яка забезпечує перетворення, розподіл і керувану передачу електричної енергії між тяговою акумуляторною батареєю, електродвигуном і допоміжними системами. Саме від її технічного стану значною мірою залежать динамічні характеристики електромобіля, стабільність роботи електропривода, ресурс обладнання та загальна експлуатаційна надійність транспортного засобу.

Особливу увагу при цьому слід приділяти тепловим режимам силової електроніки. У процесі роботи тягових інверторів і силових напівпровідникових модулів виникають провідникові та комутаційні втрати, які спричиняють нагрівання елементів і формують теплонапружений режим їх функціонування. За недостатнього тепловідведення, перевантаження, високої температури довкілля або частих перехідних процесів температура силових елементів може досягати критичних значень, що призводить до прискореного старіння, деградації ізоляції, зниження ресурсу та підвищення ймовірності відмов. У зв'язку з цим дослідження теплових режимів роботи силової електроніки електромобіля є актуальним науково-прикладним завданням.

Актуальність теми зумовлена також тим, що в реальних умовах експлуатації електромобіль працює не в сталому, а в змінному режимі, який включає розгони, гальмування, рекуперацію, короткочасні перевантаження та зміну умов охолодження. Це ускладнює оцінювання теплового стану силових модулів і вимагає застосування розрахункових та модельних підходів, які дозволяють визначити найбільш небезпечні режими функціонування та оцінити запас теплової стійкості системи.

**Метою роботи** є дослідження теплових режимів роботи силової електроніки електромобіля на прикладі тягового інвертора та оцінка впливу навантаження й умов охолодження на температурний стан силового модуля.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно було розв'язати такі **завдання**:

1. Проаналізувати роль силової електроніки в структурі електромобіля та умови її теплового навантаження.
2. Розглянути конструктивні та функціональні особливості силових напівпровідникових модулів, що застосовуються в тягових інверторах.
3. Проаналізувати основні фактори, які визначають перегрів силової електроніки електромобіля.
4. Обґрунтувати вибір об'єкта дослідження та сформувані вихідні параметри для розрахунку.
5. Розробити спрощену математичну та теплову модель силового модуля тягового інвертора.
6. Виконати дослідження теплового стану силового модуля в номінальному та змінних режимах роботи.
7. Оцінити вплив параметрів охолодження та температури навколишнього середовища на температуру переходу силового елемента.
8. Провести порівняльну оцінку теплових режимів у різних умовах експлуатації.
9. Запропонувати рекомендації щодо підвищення теплової надійності силової електроніки електромобіля.
10. Розглянути питання охорони праці під час дослідження та обслуговування силової електроніки електромобіля.

**Об'єктом дослідження** є силова електроніка електромобіля.

**Предметом дослідження** є теплові режими роботи силового модуля тягового інвертора електромобіля та чинники, що впливають на його температурний стан.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає в тому, що запропонований підхід до оцінювання теплових режимів дозволяє визначати найбільш теплонапружені режими роботи силової електроніки, оцінювати температурний запас силового модуля та виявляти критичні умови експлуатації. Отримані результати можуть бути використані для обґрунтування вимог до системи охолодження тягового інвертора, удосконалення режимів роботи силової електроніки, а також для подальших досліджень у сфері теплового менеджменту електромобілів.

У роботі застосовано методи аналізу науково-технічних джерел, розрахункові методи оцінювання втрат потужності та температурних параметрів, елементи електротеплового моделювання, а також методи порівняльного аналізу режимів роботи силової електроніки за різних умов навантаження та охолодження.

# 1 АНАЛІЗ СИЛОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ ТА УМОВ ЇЇ ТЕПЛОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ

## 1.1 Роль силової електроніки в електромобілі

Сучасний електромобіль є складною електромеханічною системою, у якій силова електроніка виконує не допоміжну, а системоутворюючу функцію. Саме вона забезпечує перетворення, розподіл і керування передачею енергії між тяговою акумуляторною батареєю, тяговим електродвигуном, допоміжними споживачами та зарядною інфраструктурою. У загальній структурі електропривода силова електроніка є тією ланкою, яка реалізує потрібний режим роботи машини, забезпечує регулювання моменту і швидкості, а також формує енергетичну ефективність усієї транспортної системи [1].

Узагальнено до складу силової електроніки електромобіля входять тяговий інвертор, DC/DC-перетворювач, бортовий зарядний пристрій, а в окремих архітектурах також додаткові модулі перетворення енергії, пов'язані з рекуперацією, тепловим менеджментом та допоміжними контурами. Тяговий інвертор перетворює постійну напругу батареї у змінну напругу необхідної форми для живлення електродвигуна; DC/DC-перетворювач забезпечує живлення низьковольтної бортової мережі; зарядний пристрій формує режим приймання енергії із зовнішньої мережі. Таким чином, силова електроніка працює як центральний енергетичний вузол, від якого залежать динамічні властивості, ККД, надійність і безпека електромобіля [2, 3].

Разом з тим аналіз літератури показує, що в навчальних посібниках силова електроніка переважно розглядається на рівні загальних принципів перетворення енергії, топології перетворювачів і контурів керування. Такий підхід є необхідним для формування базового розуміння, однак він лише частково придатний для пояснення теплових проблем електромобіля. Загальнотеоретичні джерела добре описують функції перетворювальних пристроїв, але недостатньо розкривають, як саме режимами руху, рекуперація,

циклічні перевантаження та високі струми впливають на локальні температурні режими силових модулів. Натомість сучасні англомовні огляди з електромобільної тематики підтверджують, що зі зростанням питомої потужності й вимог до компактності саме теплонапруженість силових електроніки стає одним із головних бар'єрів для підвищення надійності системи в цілому [3].

Отже, вже на рівні визначення ролі силових електроніки видно принципову суперечність: чим більша її функціональна значущість і щільність потужності, тим жорсткішими стають вимоги до теплової стабільності. Це означає, що подальший аналіз повинен переходити від загальної структури електропривода до внутрішньої будови силових модулів та причин їх нагрівання.

## **1.2 Конструктивні та функціональні особливості силових напівпровідникових модулів**

Конструкція силових напівпровідникових модулів безпосередньо визначає їх електричні й теплові властивості. У транспортних системах найбільш поширеними є модулі на основі IGBT, MOSFET та SiC MOSFET. Кожне з цих рішень має власні переваги, однак жодне з них не усуває проблему теплового навантаження, а лише змінює її форму. Традиційні IGBT-модулі характеризуються добре відпрацьованою технологією, відносно передбачуваними характеристиками та широким досвідом застосування. Водночас саме вони є чутливими до теплового циклування, локального перегріву та деградації при роботі у повторно-короткочасних режимах. У роботі, присвяченій тепловому менеджменту IGBT-пристроїв і модулів, показано, що навіть за наявності розвинених методів теплового моделювання й охолодження залишається складним завданням узгодження теплового опору, конструкції корпусу, термоінтерфейсних шарів та реальних експлуатаційних

режимів, особливо коли йдеться про високонавантажені транспортні перетворювачі [4].

У сучасних електромобілях дедалі більше поширюються SiC MOSFET, що забезпечують вищу частоту комутації, менші втрати та підвищення щільності потужності. Проте така еволюція не означає автоматичного зняття теплової проблеми. Навпаки, у спеціалізованому огляді з застосування карбіду кремнію в електрифікованому транспорті наголошено, що підвищення швидкодії та допустимих робочих температур супроводжується новими викликами: зростає чутливість до електромагнітних перешкод, загострюються вимоги до ізоляції, ускладнюється прогнозування довготривалої надійності, а система охолодження має працювати не просто ефективніше, а точніше відповідати локальним зонам тепловиділення [5].

Фізично джерела втрат у силових модулях поділяються на провідникові та комутаційні. Перші залежать насамперед від рівня струму, внутрішнього опору напівпровідникового каналу або падіння напруги на переході. Другі зумовлені процесами перемикання і суттєво зростають при збільшенні частоти комутації, крутизни фронтів та складності режиму керування. Для електромобіля це особливо важливо, оскільки перетворювач працює не в стаціонарному лабораторному режимі, а в умовах постійно змінного навантаження, коли швидкі розгони, рекуперативне гальмування та коливання моменту постійно змінюють баланс втрат.

Окрему проблему становить локальний перегрів. Він виникає не лише на рівні кристала, а й у шарах припаю, підкладках, контактних з'єднаннях, шинних комутаторах і термоінтерфейсних матеріалах. Саме тому конструктивна надійність модуля не може оцінюватися лише за середньою температурою корпусу чи радіатора. Критичними є градієнти температури, повторюваність термоциклів та локальні гарячі точки. З аналізу джерел випливає, що, попри значну кількість оглядових праць, задача точного зв'язку між конструкцією модуля, режимом навантаження і локальним тепловим станом досі не має універсального рішення. Це особливо стосується

транспортних застосувань, де обмеження за масою, об'ємом і системою охолодження значно жорсткіші, ніж у стаціонарних енергетичних установках [4, 5].

### **1.3 Теплові режими роботи силової електроніки електромобіля**

Під тепловим режимом силової електроніки доцільно розуміти сукупність температурних станів елементів перетворювача та характер їх зміни в часі під дією електричного навантаження, умов охолодження та зовнішнього середовища. Для електромобіля це поняття має принципово динамічний характер. На відміну від стаціонарних систем, де режим часто може вважатися сталим, транспортний інвертор працює в умовах безперервної зміни струмів, моментів, частоти комутації та температурної обстановки.

У наукових публікаціях теплові процеси в інверторах електромобіля зазвичай поділяють на стаціонарні та перехідні. Стаціонарний тепловий стан має місце тоді, коли температура елементів досягає квазіусталеного рівня при певному режимі навантаження. Перехідні процеси, навпаки, відображають зміну температури в часі після стрибка струму, зміни режиму руху, перемикання з тяги на рекуперацію або погіршення умов охолодження. Саме перехідні режими найкраще відображають реальні умови експлуатації електромобіля, оскільки рух у міському циклі характеризується частими змінами прискорення й навантаження.

У статті, присвяченій електротепловим моделям інвертора електромобіля, орієнтованим на швидкодію симуляції та точність, наголошено, що тепловий аналіз повинен одночасно враховувати і деталізацію моделі, і можливість її використання в інженерних розрахунках. Автори фактично фіксують ключову методичну проблему: високоточні моделі часто є обчислювально важкими, тоді як спрощені підходи втрачають чутливість до реальних коливань температури в умовах транспортного циклу [6].

Схожий висновок міститься і в роботі з розроблення електротеплових моделей для тягових систем. Її автори пропонують моделі, придатні для електричної тяги, однак підкреслюють, що для забезпечення прийняттого часу обчислень неминуче доводиться спрощувати опис процесів. Отже, навіть добре побудована електротеплова модель не завжди може повністю відтворити локальні гарячі точки, неоднорідність теплового поля й вплив реального дорожнього профілю [7].

Подальший розвиток цієї проблематики представлено у статті, де електротеплова модель інвертора для автомобільного електропривода не тільки формується, а й проходить валідацію. Це важливий крок, оскільки сама по собі модель без перевірки на відповідність фізичному об'єкту має обмежену цінність. Разом з тим необхідність окремої валідації для конкретної архітектури знову демонструє, що універсального, однаково придатного для всіх електромобілів інструмента прогнозування теплових режимів досі не існує. Кожна реальна конфігурація інвертора, система охолодження і закон керування вимагають уточнення параметрів моделі й окремого аналізу [8].

Таким чином, аналіз літератури дозволяє зробити принциповий висновок: тепловий режим силової електроніки електромобіля не можна адекватно описати лише середніми або паспортними характеристиками. Він формується під впливом струму, напруги, частоти комутації, режиму рекуперації, температури навколишнього середовища, ефективності теплообміну й тривалості навантажувальних циклів. Саме ця багатофакторність і зумовлює необхідність подальших досліджень.

#### **1.4 Основні фактори, що визначають перегрів силової електроніки**

Проблема перегріву силової електроніки не є наслідком одного окремого негативного впливу. Її формує сукупність взаємопов'язаних факторів, які в електромобілі проявляються одночасно. Першим із них є перевантаження за

струмом. При збільшенні фазного або вхідного струму зростають провідникові втрати, а разом із ними – температура напівпровідникового переходу. Для транспортного застосування це особливо характерно у режимах інтенсивного розгону, руху на підйомі, буксирування або тривалої роботи при високому крутному моменті.

Другим фактором є висока частота перемикачів. Вона необхідна для поліпшення якості керування, зменшення пульсацій струму й підвищення динамічних характеристик електропривода, але одночасно веде до збільшення комутаційних втрат. Саме тому сучасні стратегії теплового менеджменту часто намагаються не лише покращити охолодження, а й змінити закон керування самим перетворювачем. У роботі, де запропоновано нову стратегію теплового менеджменту для підвищення надійності інвертора електромобіля, показано, що адаптивне керування частотою комутації дає змогу знизити температурні навантаження. Проте це рішення не є універсальним, адже зменшення теплового навантаження за одним каналом може викликати компроміс із втратами, динамікою або електромагнітною сумісністю [9].

Третім критичним фактором є неефективне охолодження. Навіть при відносно прийнятному рівні втрат слабе тепловідведення призводить до накопичення тепла у кристалі, підкладці й корпусі модуля. Для транспортних систем ця проблема ускладнюється обмеженнями за масою, габаритами і вартістю теплообмінника, а також необхідністю інтеграції охолоджувача у загальний простір силової установки. Детальний огляд концепцій охолодження автомобільних WBG-інверторів показує, що кількість технічних рішень є великою, однак їх ефективність сильно залежить від рівня інтеграції, топології модуля, типу напівпровідника і щільності теплового потоку. Тобто сама наявність великої кількості технологій охолодження є радше ознакою незавершеності пошуку оптимального рішення, ніж свідченням повного розв'язання проблеми [10].

Четвертим фактором виступає погіршення теплового контакту. Воно може бути спричинене старінням термоінтерфейсних матеріалів, механічною

втомою з'єднань, деградацією припаю або мікродефектами в пакуванні модуля. Такі явища особливо небезпечні тим, що не завжди помітні на ранніх етапах і можуть призводити до прихованого зростання локальної температури навіть без істотної зміни зовнішніх режимів.

П'ятим фактором є вплив дорожнього циклу. Для електромобіля важливе не лише середнє навантаження, а й його часовий профіль. Часті розгони, уповільнення, зміна режиму тяга-рекуперація, короткі зупинки та повторні прискорення утворюють багатократні теплові цикли, що прискорюють старіння силових модулів. У загальних оглядах теплового менеджменту електрифікованих транспортних засобів підкреслюється, що саме інтеграція теплового аналізу з реальними режимами експлуатації є одним із найскладніших завдань сучасної інженерії електротранспорту [11, 12].

Шостим фактором є вплив зовнішнього середовища: температура повітря, умови вентиляції, стан дорожнього покриття, компоновка силової установки та загальний тепловий баланс транспортного засобу. При високій зовнішній температурі навіть коректно спроектована система охолодження може працювати з меншим запасом ефективності, а отже, швидше наближати модулі до критичних меж.

Таким чином, перегрів силової електроніки є результатом комплексної дії електричних, теплових, конструктивних і експлуатаційних чинників. Це ще раз підтверджує, що дослідження повинно бути багатофакторним, а не зводиться лише до розрахунку втрат потужності або до вибору радіатора.

## **1.5 Аналіз сучасних методів дослідження й контролю теплових режимів**

Сучасні методи дослідження теплових режимів силової електроніки можна умовно поділити на експериментальні, аналітичні та модельні. Експериментальні підходи базуються на безпосередньому вимірюванні

температури або теплових індикаторів у процесі роботи модуля. Їхньою перевагою є наближеність до реального об'єкта, проте вони зазвичай потребують складної вимірювальної інфраструктури, точного розміщення датчиків і не завжди дозволяють спостерігати температуру саме в найкритичнішій точці – на рівні переходу.

Аналітичні методи, навпаки, дозволяють швидко оцінити тепловий стан на основі втрат потужності, теплових опорів і теплових ємностей. Вони є зручними на етапі попереднього проектування, але зазвичай ґрунтуються на спрощеннях. Через це вони не завжди точно описують реальний вплив нестационарних режимів, складної геометрії модуля й неоднорідного охолодження.

Найбільш перспективними вважаються математичні та комп'ютерні моделі, які поєднують електричну й теплову підсистеми. Саме вони дають змогу прогнозувати температуру в широкому діапазоні навантажень, аналізувати наслідки зміни конструкції та моделювати режими, які важко відтворити експериментально. Проте, як показують проаналізовані роботи, навіть у цій сфері зберігається фундаментальне протиріччя між швидкодією, точністю та універсальністю моделі. Одні підходи добре працюють для детального аналізу окремого інвертора, але є занадто складними для системного моделювання; інші придатні для швидких інженерних оцінок, але недостатньо чутливі до локальних теплових ефектів [6 - 8].

На рівні системного теплового менеджменту транспортного засобу ситуація ще складніша. Узагальнюючі огляди з теплового керування електрифікованими транспортними засобами переконливо показують, що силова електроніка не може розглядатися ізольовано від батареї, електродвигуна, системи кондиціонування, теплонасосного контуру й загальної архітектури охолодження. Проте така системність має і зворотний бік: у широких оглядах часто втрачається детальний аналіз локального теплового стану конкретного силового модуля. Унаслідок цього загальний тепловий менеджмент транспортного засобу описується достатньо повно, а

питання детального прогнозування перегріву окремих елементів силової електроніки все ще залишається відкритим [11, 12].

Критичний аналіз літератури дає підстави стверджувати, що жоден із сучасних підходів не є вичерпним сам по собі. Експериментальні методи обмежені доступністю внутрішніх температур і складністю стендової реалізації. Аналітичні схеми занадто грубі для опису транспортного циклу. Чисельні та електротеплові моделі потребують валідації й часто залишаються прив'язаними до конкретної топології або конкретного перетворювача. Оглядові роботи з охолодження демонструють багатоваріантність технічних рішень, але не дають універсального критерію їх вибору. Саме тому проблема дослідження теплових режимів силової електроніки електромобіля не може вважатися остаточно вирішеною.

## **1.6 Постановка задач дослідження**

Проведений аналіз наукових праць, навчальних посібників і сучасних оглядових джерел показав, що силова електроніка електромобіля є одним із найбільш теплонапружених елементів електроприводної системи. Її тепловий стан визначається не одним чинником, а сукупною дією електричного навантаження, частоти комутації, конструктивних особливостей силових модулів, ефективності системи охолодження, режимів руху транспортного засобу та умов зовнішнього середовища. При цьому навіть за наявності значної кількості публікацій у цій галузі проблема не може вважатися остаточно розв'язаною, оскільки більшість досліджень або мають оглядовий характер, або зосереджені на окремих вузьких аспектах – типі напівпровідника, способі охолодження, методі моделювання чи конкретному варіанті інвертора [6, 8].

Установлено, що в сучасній літературі недостатньо повно розкрито питання комплексного дослідження теплових режимів силової електроніки

електромобіля в умовах змінного транспортного циклу. Частина авторів концентрується на високоточних електротеплових моделях, однак такі моделі часто є обчислювально складними і потребують окремої адаптації до конкретної конфігурації перетворювача. Інші дослідження пропонують спрощені підходи, придатні для інженерних оцінок, але менш чутливі до локальних зон перегріву, повторюваних термоциклів і впливу змінних режимів руху. Окремо залишається відкритим питання поєднання конструктивних, режимних і теплових факторів в єдиній схемі аналізу, яка дозволила б оцінити не лише середній температурний рівень, а й потенційно небезпечні режими роботи силових модулів [7, 9].

У зв'язку з цим у роботі доцільно поставити за мету дослідження теплових режимів роботи силової електроніки електромобіля та визначення факторів, що найбільш істотно впливають на її теплонапруженість, надійність і вимоги до теплового менеджменту.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі задачі:

1. Проаналізувати роль силової електроніки в структурі електропривода електромобіля та визначити основні вузли, для яких тепловий стан є критичним.
2. Розглянути конструктивні та функціональні особливості силових напівпровідникових модулів, що застосовуються в електромобілях, а також встановити основні джерела теплових втрат у таких модулях.
3. Дослідити вплив електричних і експлуатаційних параметрів, зокрема струму, напруги, частоти комутації, режимів тяги та рекуперації, на формування теплового режиму силової електроніки.
4. Систематизувати основні чинники, що призводять до перегріву силових модулів, з урахуванням конструкції, умов охолодження, транспортного циклу та зовнішнього середовища.
5. Проаналізувати сучасні методи дослідження, розрахунку, контролю та моделювання теплових режимів силової електроніки електромобіля, визначити їх переваги, обмеження та межі практичного застосування.

6. Обґрунтувати необхідність побудови розрахункової або електротеплової моделі для дослідження теплонапружених режимів роботи силової електроніки електромобіля.
7. Визначити характерні режими роботи, за яких силові напівпровідникові модулі зазнають найбільшого теплового навантаження, та сформулювати основу для подальшого аналізу й оцінювання їх температурного стану.

Таким чином, підпункт постановки задач дослідження логічно завершує оглядовий розділ і формує перехід до наступного етапу роботи, у якому вже мають розглядатися вибір об'єкта дослідження, побудова моделі та аналіз теплових режимів у конкретних умовах функціонування електромобіля.

## **Висновки до розділу 1**

У першому розділі проаналізовано роль силової електроніки в структурі електромобіля та встановлено, що саме вона забезпечує кероване перетворення і розподіл електричної енергії між тяговою батареєю, електродвигуном, допоміжними споживачами та зарядними пристроями. Показано, що найбільш теплонапруженими елементами є силові напівпровідникові модулі інверторів і перетворювачів, тепловий стан яких визначається сукупною дією електричного навантаження, комутаційних процесів, конструктивних особливостей модуля, ефективності охолодження, режимів тяги та рекуперації, а також умов зовнішнього середовища. Аналіз літературних джерел підтвердив, що навіть за наявності сучасних IGBT-, MOSFET- та SiC-рішень проблема перегріву не втрачає актуальності, а набуває нових форм через зростання щільності потужності, складність теплових режимів і підвищення вимог до надійності електромобіля.

Разом з тим встановлено, що існуючі методи дослідження теплових режимів мають певні обмеження: експериментальні підходи не завжди дають змогу оцінити температуру в критичних внутрішніх точках, аналітичні методи

часто спрощують реальні процеси, а електротеплові моделі потребують адаптації до конкретної архітектури силового перетворювача. Це свідчить про те, що проблема комплексної оцінки теплових режимів силової електроніки електромобіля в умовах змінного транспортного циклу залишається недостатньо розв'язаною. Отже, подальше дослідження доцільно спрямувати на побудову розрахункової або електротеплової моделі, яка дозволить визначити найбільш небезпечні режими роботи силових модулів і оцінити основні фактори, що впливають на їх теплонапруженість.

## **2 РОЗРОБКА МОДЕЛІ ТА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВИХ РЕЖИМІВ СИЛОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ**

### **2.1 Вибір об'єкта дослідження та вихідних параметрів**

Як конкретний об'єкт дослідження в роботі прийнято тяговий інвертор електромобіля Nissan LEAF 40 kWh. Такий вибір є доцільним, оскільки LEAF належить до найпоширеніших серійних електромобілів, а його основні параметри доступні у відкритих офіційних матеріалах. Для моделі приймається версія з батареєю 40 кВт·год, тяговим електродвигуном потужністю 110 кВт та моментом 236 lb-ft, тобто приблизно 320 Н·м. Робочий діапазон напруги батареї становить 240–420 В, що є важливим для визначення струмового навантаження інвертора [13].

У структурі дослідження як розрахунковий елемент доцільно прийняти еквівалентний силовий модуль одного плеча трифазного двошівневого інвертора. Такий підхід дозволяє зберегти зв'язок із реальною конструкцією тягового перетворювача, але не перевантажувати модель деталями, які виробник у відкритих матеріалах не розкриває. Відомо, що силовий тракт

LEAF належить до високовольтної системи, а інвертор працює у складі силового привода між батареєю та тяговим двигуном [14].

Для подальших розрахунків приймаємо такі вихідні дані:

- максимальна механічна потужність привода:  $P_{m,max}=110$  кВт;
- робочий діапазон напруги батареї:  $U_{dc}=240\dots420$  В;
- умовна номінальна напруга для моделі:

$$U_{dc,nom} = \frac{240 + 420}{2} = 330 \text{ В};$$

- температура довкілля в базовому режимі:  $T_a=35^\circ\text{C}$ ;
- температура довкілля у важких умовах:  $T_a=45^\circ\text{C}$ ;
- гранично допустима температура переходу:  $T_{j,lim}=150^\circ\text{C}$ .

Оскільки у відкритих джерелах Nissan не наведено паспортних теплових параметрів серійного силового модуля інвертора, у розрахунковій моделі прийнято еквівалентні параметри рідинно охолоджуваного автомобільного модуля:

$$R_{th,jc} = 0,015 \text{ К/Вт},$$

$$R_{th,ch} = 0,005 \text{ К/Вт},$$

$$R_{th,ha} = 0,030 \text{ К/Вт},$$

$$R_{th,ja} = R_{th,jc} + R_{th,ch} + R_{th,ha} = 0,050 \text{ К/Вт}. \quad (2.1)$$

Для перехідного режиму приймаємо еквівалентну теплову ємність модуля:

$$C_{th} = 1200 \text{ Дж/К}.$$

Тоді теплова стала часу:

$$\tau = R_{th,ja} \cdot C_{th} = 0,05 \cdot 1200 = 60 \text{ с}. \quad (2.2)$$

Для оцінки струмового навантаження інвертора приймаємо модельний ККД інвертора

$$\eta_{inv} = 0,96.$$

Тоді розрахунковий струм постійного кола при максимальній потужності двигуна становить:

$$I_{dc} = \frac{P_m}{\eta_{inv} U_{dc}}. \quad (2.3)$$

Для трьох характерних напруг отримаємо:

$$I_{dc,240} = \frac{110000}{0,96 \cdot 240} = 477,4 \text{ A},$$

$$I_{dc,330} = \frac{110000}{0,96 \cdot 330} = 347,2 \text{ A},$$

$$I_{dc,420} = \frac{110000}{0,96 \cdot 420} = 272,8 \text{ A}.$$

Отже, вже на етапі вибору вихідних параметрів видно, що при зниженні напруги батареї струмове навантаження на інвертор істотно зростає, а отже, саме низьковольтна область робочого діапазону є найбільш небезпечною з точки зору теплового навантаження.

## 2.2 Математичний опис теплових процесів у силових елементах

Для обраного об'єкта дослідження теплова модель будується на основі зв'язку між електричним навантаженням, потужністю втрат і температурою переходу силового модуля. Сумарні втрати в інверторі визначаються як сума провідникових і комутаційних втрат:

$$P_{\Sigma} = P_{cond} + P_{sw}. \quad (2.4)$$

У загальному вигляді для силового ключа:

$$P_{cond} = I^2 R_{eq}, \quad (2.5)$$

$$P_{sw} = f_{sw}(E_{on} + E_{off}). \quad (2.6)$$

Однак для конкретного серійного інвертора Nissan LEAF точні паспортні значення  $R_{eq}$ ,  $E_{on}$ ,  $E_{off}$  і частотні карти втрат у відкритих даних відсутні. Тому в розрахунковому прикладі застосовано інженерне еквівалентне представлення через ККД інвертора:

$$P_{\Sigma} = P_m \left( \frac{1}{\eta_{inv}} - 1 \right). \quad (2.7)$$

Для максимального режиму потужності LEAF:

$$P_{\Sigma} = 110 \left( \frac{1}{0,96} - 1 \right) = 4,58 \text{ кВт.}$$

Оскільки інвертор трифазний, а модель будується для одного фазного плеча, приймаємо розподіл втрат по трьох плечах:

$$P_{\Sigma,mod} = \frac{4,58}{3} = 1,53 \text{ кВт.}$$

Для подальшого сценарного аналізу приймаємо, що в номінальному режимі 60 % сумарних втрат становлять провідникові втрати, а 40 % – комутаційні:

$$P_{cond,nom} = 0,6 \cdot 4,58 = 2,75 \text{ кВт,}$$

$$P_{sw,nom} = 0,4 \cdot 4,58 = 1,83 \text{ кВт.}$$

Для режиму підвищеного струму приймаємо

$$I = 1,2I_{nom}. \quad (2.8)$$

Тоді:

- провідникові втрати зростають пропорційно  $I^2$ ,
- комутаційні – пропорційно  $I$ .

Отже:

$$P_{cond,ov} = 2,75 \cdot 1,2^2 = 3,96 \text{ кВт,}$$

$$P_{sw,ov} = 1,83 \cdot 1,2 = 2,20 \text{ кВт},$$

$$P_{\Sigma,ov} = 3,96 + 2,20 = 6,16 \text{ кВт}.$$

На один модуль:

$$P_{\Sigma,ov,mod} = \frac{6,16}{3} = 2,05 \text{ кВт}.$$

Температура переходу в усталеому режимі визначається:

$$T_j = T_a + P_{mod} R_{th,ja}. \quad (2.9)$$

Для базового режиму при  $T_a=35^\circ\text{C}$ :

$$T_{j,nom} = 35 + 1527,8 \cdot 0,05 = 111,4^\circ\text{C}.$$

Для режиму струмового перевантаження:

$$T_{j,ov} = 35 + 2053,3 \cdot 0,05 = 137,7^\circ\text{C}.$$

Для режиму підвищеної температури довкілля  $T_a=45^\circ\text{C}$ :

$$T_{j,hot} = 45 + 1527,8 \cdot 0,05 = 121,4^\circ\text{C}.$$

Для випадку погіршеного охолодження, коли

$$R_{th,ha} = 0,05 \text{ К/Вт},$$

маємо:

$$R_{th,ja} = 0,015 + 0,005 + 0,05 = 0,07 \text{ К/Вт},$$

$$T_{j,cool} = 35 + 1527,8 \cdot 0,07 = 141,9^\circ\text{C}.$$

Отримані значення показують, що навіть за відсутності перевищення граничної температури  $150^\circ\text{C}$  система в ряді режимів працює з малим тепловим запасом. Найнебезпечнішими є режими низької напруги батареї, перевантаження та погіршеного охолодження.

Для перехідного процесу використовуємо одноємнісну RC-модель:

$$C_{th} \frac{dT_j}{dt} + \frac{T_j - T_a}{R_{th,ja}} = P_{mod}(t). \quad (2.10)$$

Розв'язок для стрибкоподібного навантаження:

$$T_j(t) = T_a + P_{mod} R_{th,ja} \left(1 - e^{-t/\tau}\right). \quad (2.11)$$

Для номінального режиму через 300 с після пуску:

$$T_j(300) = 35 + 1527,8 \cdot 0,05 \left(1 - e^{-300/60}\right) = 110,9^\circ C.$$

Тобто вже через 5 хв роботи модуль практично досягає усталеного температурного рівня.

### 2.3 Методика розрахунку температурних режимів

Для дослідження теплових режимів тягового інвертора електромобіля Nissan LEAF 40 kWh у роботі застосовано послідовну методику, яка забезпечує перехід від вихідних технічних параметрів транспортного засобу до оцінки температурного стану силового модуля.

Методика орієнтована на дослідження теплового режиму силового модуля тягового інвертора в характерних умовах роботи електромобіля. Вона дозволяє встановити, як зміна навантаження, режиму руху, температури навколишнього середовища та ефективності охолодження впливає на температуру силового переходу, а отже – і на рівень теплонапруженості силової електроніки в цілому.

Послідовність виконання дослідження наведено на рис. 2.1.



Рисунок 2.1 – Блок-схема методики розрахунку температурних режимів силового модуля тягового інвертора

Як видно з блок-схеми (рис. 2.1), методика складається з восьми послідовних етапів, кожен із яких має самостійне функціональне призначення.

На першому етапі задаються вихідні дані об'єкта дослідження. У роботі таким об'єктом є тяговий інвертор електромобіля Nissan LEAF 40 kWh. На цьому етапі використовуються параметри автомобіля, прийняті в підпункті

2.1, а також встановлюються умови навколишнього середовища і початкові обмеження дослідження. Саме тут формується вхідна база, від якої надалі залежить коректність усіх подальших розрахунків.

На другому етапі виконується вибір розрахункових режимів роботи. Оскільки тепловий стан силової електроніки істотно змінюється залежно від умов експлуатації, дослідження повинне охоплювати не один, а декілька характерних сценаріїв. До таких сценаріїв доцільно віднести номінальний режим, режим перевантаження, режим роботи в міському циклі з частими розгонами та гальмуваннями, режим підвищеної температури довкілля, а також режим погіршеного охолодження. Такий підхід дозволяє виявити не лише середній тепловий стан, а й найбільш небезпечні умови функціонування інвертора.

На третьому етапі визначається електричне навантаження інвертора для кожного з обраних сценаріїв. На цьому етапі встановлюються значення напруги, струму, характеру навантаження і тривалості дії режиму. Таким чином, формується електрична основа дослідження, яка надалі використовується для оцінювання тепловиділення в силовому модулі.

На четвертому етапі за залежностями, наведеними в підпункті 2.2, обчислюються втрати потужності силового модуля. У межах роботи ці втрати розглядаються як головне джерело нагрівання силових елементів. Саме перехід від електричного режиму до потужності втрат є ключовим моментом методики, оскільки він поєднує електричну й теплову частини дослідження.

На п'ятому етапі формується теплова модель силового модуля. У роботі використано еквівалентний тепловий ланцюг, який відображає послідовне передавання тепла від напівпровідникового переходу до корпусу, далі до охолоджувача і, зрештою, у навколишнє середовище. Така схема є достатньо наочною та водночас придатною для розрахункового аналізу як усталених, так і перехідних режимів нагрівання.

На шостому етапі визначаються температурні параметри модуля. Основним результатом тут є температура переходу, оскільки саме вона є

найбільш критичним показником із погляду теплової надійності напівпровідникового приладу. Додатково можуть оцінюватися температура корпусу та температура охолоджувача, що дозволяє більш повно простежити розподіл температурного перепаду в системі. На цьому ж етапі визначається поведінка системи в усталеному та перехідному режимах.

На сьомому етапі отримані результати порівнюються з допустимими межами. Це дає змогу оцінити, чи не перевищує температура переходу допустиме значення, а також який саме температурний запас залишається у системи в кожному з розглянутих режимів. Таким чином, розрахунок переходить від простої фіксації температури до її інженерної оцінки.

На восьмому етапі здійснюється узагальнений аналіз теплонапруженості силового модуля та формуються висновки щодо найбільш небезпечних режимів експлуатації. На цьому етапі встановлюється, за яких умов інвертор працює з мінімальним температурним запасом, які фактори найбільше впливають на його тепловий стан і які режими потребують особливої уваги в подальшому аналізі.

Таким чином, запропонована методика визначає послідовність практичного застосування моделі до конкретного об'єкта дослідження. Її перевага полягає в тому, що вона дозволяє системно пов'язати вихідні технічні параметри електромобіля, електричне навантаження тягового інвертора, теплову модель силового модуля та кінцеві критерії оцінки його температурного стану. Саме тому ця методика є основою подальшого дослідження теплових режимів у конкретних умовах експлуатації.

## **2.4 Розробка структури дослідної або комп'ютерної моделі**

Для реалізації дослідження теплових режимів тягового інвертора електромобіля Nissan LEAF 40 kWh у роботі прийнято структуру спрощеної комп'ютерної моделі, яка забезпечує послідовний зв'язок між вихідними

параметрами електропривода, електричним навантаженням інвертора, втратами потужності та температурним станом силового модуля. Така модель повинна бути достатньо простою для практичної реалізації, але водночас зберігати фізичний зміст процесів, що відбуваються в силовій електроніці при зміні режимів роботи електромобіля. Розглянемо внутрішню структуру моделі, тобто склад її функціональних блоків, взаємозв'язок між ними та перелік параметрів, що передаються від одного блоку до іншого. Модель будується як сукупність взаємопов'язаних розрахункових блоків, кожен із яких виконує окрему функцію в загальній схемі дослідження (рис.2.2).

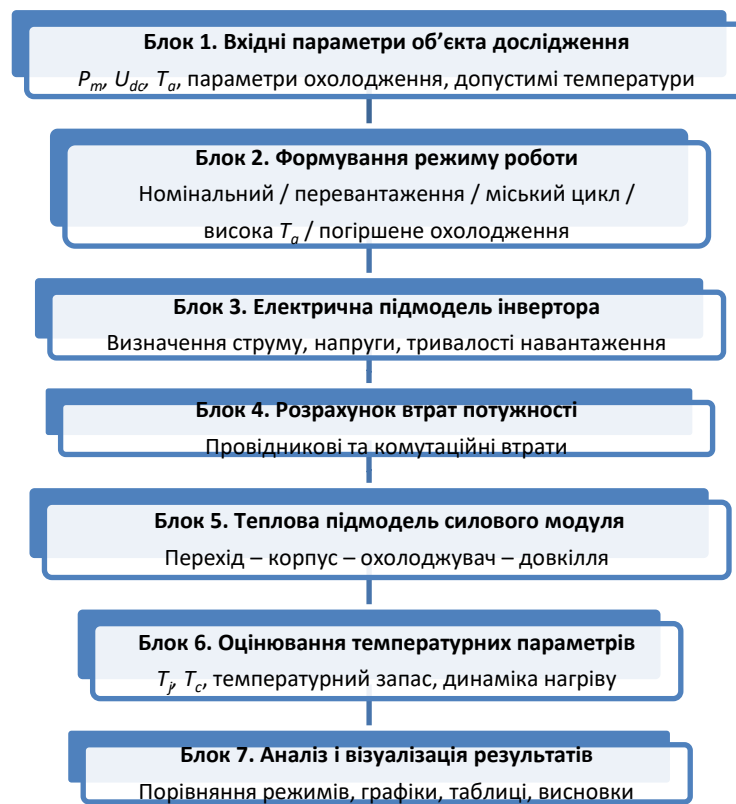


Рисунок 2.2 – Функціональна схема комп'ютерної моделі дослідження теплових режимів силового модуля тягового інвертора

Перший блок моделі формує вхідні параметри об'єкта дослідження. До нього належать технічні характеристики електромобіля, параметри тягового електропривода, робочий діапазон напруги тягової батареї, параметри середовища та характеристики системи охолодження. На цьому етапі

задаються початкові умови, які визначають межі всього подальшого розрахунку.

Другий блок є блоком формування режиму роботи. У ньому задається сценарій дослідження: номінальний режим, режим перевантаження, режим міського циклу, режим підвищеної температури довкілля або режим погіршеного охолодження. Саме цей блок задає характер навантаження, яке потім передається в електричну частину моделі.

Третій блок являє собою електричну підмодель інвертора. Його призначення полягає у визначенні електричного навантаження силового модуля для обраного режиму. На виході цього блоку формуються розрахункові значення напруги, струму та тривалості дії навантаження. У межах спрощеної моделі саме ці параметри використовуються як основа для подальшого визначення потужності втрат.

Четвертий блок є блоком розрахунку втрат потужності. У ньому на основі результатів електричної підмоделі визначаються сумарні втрати в силовому модулі, які виступають тепловим збуренням для подальшої теплової підмоделі. На цьому етапі відбувається перехід від електричного опису режиму до теплового.

П'ятий блок – це тепла підмодель силового модуля. Вона реалізує еквівалентний тепловий ланцюг «перехід – корпус – охолоджувач – навколишнє середовище» та забезпечує визначення температурних параметрів модуля. У цьому блоці враховуються теплові опори, тепла інерційність та умови тепловідведення. Саме він є центральним у дослідженні, оскільки дозволяє визначити температуру переходу як головний показник теплонапруженості силового елемента.

Шостий блок є блоком оцінювання результатів. У ньому розраховані температурні параметри порівнюються з допустимими межами, визначається температурний запас та встановлюється рівень теплової небезпеки обраного режиму. Цей блок формує кінцеві показники, за якими виконується аналіз ефективності теплового режиму.

Сьомий блок є блоком аналізу та візуалізації результатів. У ньому здійснюється порівняння температурних режимів у різних сценаріях роботи, виявляються найбільш небезпечні умови експлуатації, а також формується база для побудови графіків, таблиць і подальших висновків. Саме цей блок забезпечує інтерпретацію результатів моделювання в інженерному сенсі.

Функціональна схема, наведена на рисунку 2.2, показує, що модель має послідовну структуру. Спочатку вводяться параметри конкретного електромобіля та умови дослідження. Після цього формується режим роботи, який визначає характер навантаження тягового інвертора. На основі цього режиму електрична підмодель визначає робочі електричні параметри, що використовуються для розрахунку втрат потужності. Отримані втрати передаються до теплової підмоделі, де формується температурний стан силового модуля. Далі результати оцінюються з точки зору допустимих температурних меж, після чого виконуються їх аналіз і графічне представлення.

Запропонована структура моделі є придатною для реалізації в табличному процесорі, математичному пакеті або середовищі комп'ютерного моделювання. Її перевага полягає в тому, що вона дозволяє досліджувати різні сценарії роботи електромобіля без зміни загальної логіки розрахунку. Зміна режиму, температури довкілля або параметрів охолодження вимагає лише коригування вхідних даних, тоді як сама структура моделі залишається сталою.

У межах даної роботи така модель є достатньою для оцінювання теплових режимів тягового інвертора Nissan LEAF 40 kWh, оскільки забезпечує зв'язок між режимами експлуатації електромобіля та температурним станом силового модуля, що і є основною метою дослідження.

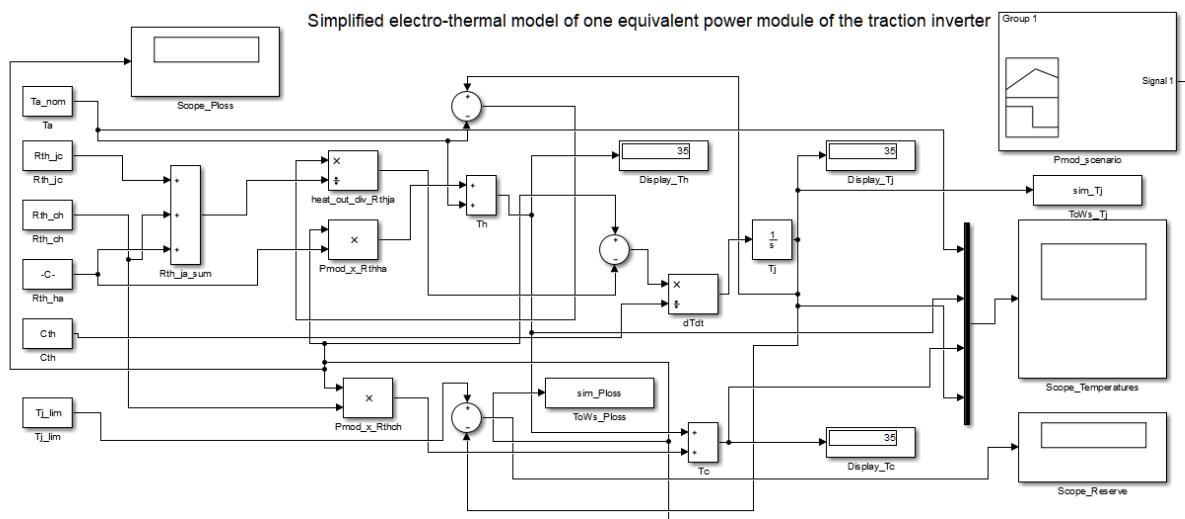
Запропонована модель у межах даної роботи реалізована як структурно-розрахункова схема, у якій вхідними параметрами є потужність електропривода, напруга тягової батареї, температура довкілля та параметри охолодження, а вихідними – втрати потужності, температура переходу,

температура корпусу та температурний запас силового модуля. Розрахунок температурних параметрів виконується на основі залежностей, наведених у підпункті 2.2, для обраних режимів роботи електромобіля.

Таким чином, комп'ютерна модель має ієрархічну структуру, в якій кожний наступний блок використовує результати попереднього. Це дозволяє побудувати логічно завершену схему дослідження, у якій вхідні параметри електромобіля послідовно перетворюються на температурні характеристики силового модуля.

#### 2.4.1 Розробка структури комп'ютерної моделі

Для дослідження теплових режимів силового модуля тягового інвертора електромобіля Nissan LEAF 40 kWh у роботі розроблено спрощену комп'ютерну модель у середовищі MATLAB/Simulink (рис.2.3). Використання цього середовища дозволяє подати математичну та теплову модель у вигляді функціонально пов'язаних блоків, що забезпечують послідовний перехід від вихідних параметрів електропривода до визначення температурного стану силового модуля в усталених і перехідних режимах.



Model of the thermal state of an equivalent power module of the traction inverter for Nissan LEAF 40 kWh

Рисунок 2.3 – Спрощена комп'ютерна модель у середовищі  
MATLAB/Simulink

Основою моделі є структурна схема, що включає блок задання вхідних параметрів, блок формування режиму роботи, електричну підмодель інвертора, блок розрахунку втрат потужності, теплову підмодель силового модуля, блок оцінювання температурних параметрів та блок аналізу результатів. Така структура дозволяє досліджувати вплив зміни навантаження, параметрів охолодження та температури навколишнього середовища на температуру переходу силового модуля.

Функціональна структура моделі, наведена на рисунку 2.2, відображає логіку розрахунку теплового стану силового модуля. На вході моделі задаються температура навколишнього середовища, теплові опори окремих ділянок теплового шляху, теплова ємність, гранично допустима температура переходу та сценарій зміни навантаження. Далі формується сумарний тепловий опір, виконується розрахунок теплового потоку, визначаються температури охолоджувача, корпусу та переходу, а також обчислюється температурний запас до гранично допустимого значення. На виході моделі формуються сигнали для відображення та подальшого аналізу в блоках спостереження.

Особливістю розробленої моделі є використання окремого блоку формування сценарію навантаження, що дає можливість досліджувати не лише усталений режим, а й короткочасні перевантаження, повторно-короткочасні цикли та інші змінні режими роботи. Саме це забезпечує наближення моделювання до реальних умов експлуатації електромобіля, для яких характерні розгони, гальмування, рекуперація та зміна струмового навантаження (рис. 2.4).

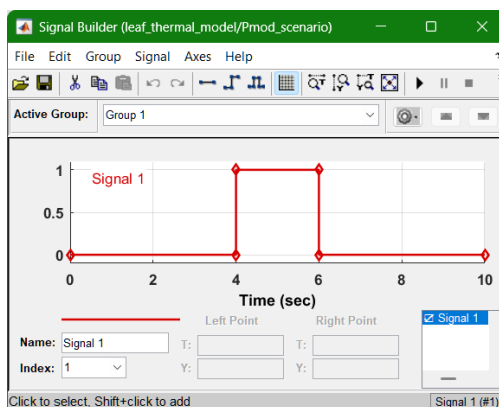


Рисунок 2.4 – Формування сценарію навантаження силового модуля в блоці Signal Builder

Як показано на рисунку 2.4, для задання режимів роботи в моделі використано блок Signal Builder, у якому формується часовий закон зміни сигналу навантаження. У наведеному прикладі реалізовано короткочасний імпульсний вплив, що відповідає режиму перевантаження в заданому часовому інтервалі. Зміна параметрів цього сигналу дозволяє моделювати різні варіанти роботи тягового інвертора: номінальний режим, короткочасне перевантаження, повторно-короткочасний міський цикл, а також інші сценарії, що розглядаються у результативному розділі роботи.

У моделі для контролю результатів застосовано вікна спостереження Score, за допомогою яких здійснюється реєстрація основних вихідних параметрів. До них належать потужність втрат, температури окремих елементів теплового ланцюга та температурний запас. Таке представлення результатів є зручним для аналізу перехідних процесів і для подальшого експорту графіків у матеріали бакалаврської роботи.

На рисунку 2.5 наведено приклад вікон Score, у яких відображаються результати моделювання: зміна втрат потужності, температурних параметрів та температурного запасу. Використання таких вікон дозволяє візуально простежити характер перехідних процесів, оцінити швидкість нагріву силового модуля та виявити режими, у яких температура переходу наближається до гранично допустимого значення. При цьому в подальшому, у

третьому розділі, результати моделювання подаються вже у вигляді окремих графіків і діаграм, придатних для порівняльного аналізу.

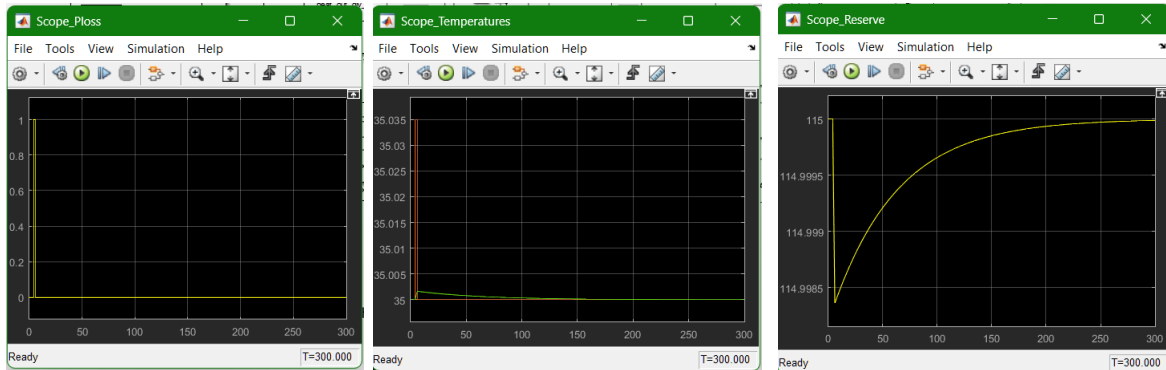


Рисунок 2.5 – Вікна спостереження результатів моделювання в середовищі MATLAB/Simulink

Таким чином, розроблена комп'ютерна модель у середовищі MATLAB/Simulink забезпечує послідовний зв'язок між вхідними параметрами електропривода, режимом роботи інвертора, втратами потужності та температурним станом силового модуля. Використання блоку формування сценаріїв навантаження та блоків візуалізації результатів дозволяє застосовувати модель для дослідження як усталених, так і перехідних теплових режимів, що створює необхідну основу для подальшого аналізу результатів у третьому розділі.

## 2.5 Критерії оцінки ефективності теплового режиму

Для оцінювання теплового стану силового модуля тягового інвертора недостатньо визначити лише одне значення температури. Ефективність теплового режиму повинна оцінюватися за сукупністю показників, які дозволяють встановити не тільки факт нагрівання, а й ступінь його допустимості, наявність температурного запасу, швидкість зміни температури та потенційний вплив на надійність силової електроніки. Саме тому в межах даної роботи вводиться система критеріїв, за якими виконується порівняння

розрахованих режимів роботи тягового інвертора електромобіля Nissan LEAF 40 kWh.

Основним критерієм оцінювання приймається максимальна температура силового переходу. Такий вибір обумовлений тим, що саме температура переходу є найбільш чутливим показником теплового стану напівпровідникового елемента і найбільшою мірою впливає на ризик термічного пошкодження, деградації параметрів та зменшення ресурсу силового модуля. Якщо температура переходу наближається до гранично допустимого значення, режим роботи слід розглядати як потенційно небезпечний навіть у тому випадку, коли перевищення ще не відбулося.

Другим критерієм є температурний запас до гранично допустимого значення. Цей показник характеризує ступінь віддаленості реального теплового стану модуля від небезпечної межі. Чим меншим є температурний запас, тим вищою є чутливість системи до випадкових коливань навантаження, погіршення тепловідведення, зростання температури довкілля або похибок розрахункової моделі. Практично цей критерій є важливим тому, що він дозволяє оцінити не тільки поточний стан модуля, а й його експлуатаційну стійкість у змінних умовах.

Третім критерієм є середній температурний рівень силового модуля у межах розрахункового інтервалу або заданого режиму роботи. На відміну від максимальної температури переходу, цей показник характеризує загальний тепловий фон, у якому працює силова електроніка. Саме середня температура є важливою для оцінки накопичення тепла в системі, особливо у випадках повторно-короткочасних режимів, характерних для міського циклу руху електромобіля.

Четвертим критерієм виступає динаміка нагріву, тобто характер зміни температури в часі. З інженерної точки зору важливим є не лише кінцеве значення температури, а й те, наскільки швидко силовий модуль наближається до критичного стану. У режимах із частими розгонами, гальмуваннями та перемиканнями навантаження швидкість нагріву може суттєво впливати на

термічну стійкість модуля, навіть якщо середнє значення температури не є надмірним. Тому при аналізі результатів доцільно враховувати інтенсивність зростання температури та здатність системи охолодження обмежувати цей процес.

П'ятим критерієм є стійкість режиму до термічного перевантаження. Цей критерій відображає, наскільки довго силовий модуль може працювати в заданому режимі без переходу в небезпечну температурну область. Його доцільно враховувати при аналізі режимів перевантаження, тривалої роботи в умовах підвищеної температури довкілля, а також при погіршенні параметрів охолодження. Фактично цей критерій дає змогу перейти від разової оцінки температури до аналізу термічної витривалості силового модуля.

Шостим критерієм є вплив теплового режиму на надійність силової електроніки. Навіть у тих випадках, коли гранична температура переходу не досягається, часті теплові цикли, високі робочі температури та недостатній температурний запас можуть прискорювати старіння напівпровідникових переходів, паяних з'єднань, підкладок і термоінтерфейсних матеріалів. У зв'язку з цим під час оцінювання результатів слід враховувати не лише окремі температурні значення, а й повторюваність теплонапружених режимів, характерних для експлуатації електромобіля в міських умовах.

Основні критерії оцінки наведені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Критерії оцінки ефективності теплового режиму силового модуля тягового інвертора

Критерій	Позначення	Одиниця виміру	Характеристика критерію	Оціночне значення
Максимальна температура переходу	$T_{j,max}$	°C	Основний показник теплонапруженості силового приладу	Не повинна перевищувати $T_{j,max}$
Гранично допустима температура переходу	$T_{j,lim}$	°C	Межа безпечної роботи напівпровідникового елемента	150
Температурний запас	$\Delta T_{res}$	°C	Різниця між допустимою та фактичною максимальною температурою	Чим більше, тим краще

Критерій	Позначення	Одиниця виміру	Характеристика критерію	Оціночне значення
Середня температура модуля	$T_{avg}$	°C	Характеризує загальний тепловий фон роботи модуля	Оцінюється порівняльно
Швидкість нагріву	$v_T$	°C/c	Відображає інтенсивність зростання температури в часі	Чим менше, тим краще
Час виходу на усталений режим	$t_{st}$	с	Характеризує теплову інерційність модуля	Визначається розрахунком
Рівень теплового ризику	–	–	Якісна оцінка режиму роботи	Безпечний / напружений / передкритичний / недопустимий

У таблиці 2.1 наведено основні критерії, за якими в роботі буде оцінюватися ефективність теплового режиму силового модуля тягового інвертора. Наведені показники дозволяють виконати не лише кількісну оцінку температурного стану, а й визначити рівень теплонапруженості режиму, запас до гранично допустимої температури та потенційний вплив на надійність силової електроніки. Саме за цими критеріями у наступному розділі буде виконано порівняння результатів розрахунку для різних умов експлуатації електромобіля.

Для практичного застосування в межах даної роботи доцільно використовувати градацію теплових режимів за рівнем небезпеки. Якщо розрахована температура переходу залишається суттєво нижчою за гранично допустиме значення, такий режим можна вважати безпечним. Якщо температура переходу наближається до граничної межі, режим слід розглядати як напружений або передкритичний. У разі досягнення або перевищення допустимої температури режим вважається недопустимим і потребує зміни умов роботи або вдосконалення системи охолодження.

Отже, система критеріїв оцінки ефективності теплового режиму в даній роботі включає максимальну температуру переходу, температурний запас, середній температурний рівень, динаміку нагріву, стійкість до термічного перевантаження та вплив температурного режиму на надійність силового модуля. Такий підхід дозволяє комплексно оцінити теплонапруженість

тягового інвертора електромобіля Nissan LEAF 40 kWh та забезпечує основу для подальшого аналізу розрахованих режимів у наступному розділі.

## **Висновки до розділу 2**

У другому розділі обґрунтовано вибір об'єкта дослідження – тягового інвертора електромобіля Nissan LEAF 40 kWh – та визначено основні вихідні параметри для аналізу його теплових режимів. Сформовано математичну основу дослідження, побудовано спрощену теплову модель силового модуля та розроблено методику розрахунку температурних параметрів в усталених і перехідних режимах роботи.

Також розроблено структуру комп'ютерної моделі та визначено критерії оцінки ефективності теплового режиму, зокрема максимальну температуру переходу, температурний запас і рівень теплонапруженості. Це створило необхідну базу для подальшого дослідження теплового стану силової електроніки в різних умовах експлуатації, наведеного у третьому розділі.

### 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВИХ РЕЖИМІВ ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ СИЛОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

#### 3.1 Дослідження теплового стану в номінальному режимі роботи

Дослідження виконувалося на прикладі моделі електромобіля **Nissan LEAF 40 kWh** та вихідних даних розділу 2: потужність тягового привода 110 кВт, діапазон напруги батареї 240–420 В, базова температура доквілля 35 °С, підвищена – 45 °С. За офіційними матеріалами Nissan, LEAF 40 kWh має тяговий електродвигун потужністю 110 кВт, а робочий діапазон високовольтної батареї становить 240–420 В [13, 14].

Базовим сценарієм для подальшого аналізу прийнято номінальний режим роботи тягового інвертора електромобіля Nissan LEAF 40 kWh при температурі навколишнього середовища 35 °С та еквівалентному сумарному тепловому опорі силового модуля  $R_{th,ja}=0,05$  К/Вт. У цьому режимі як розрахунковий об'єкт розглядається один еквівалентний силовий модуль одного плеча трифазного інвертора.

За результатами розрахунку, виконаного в розділі 2, сумарні втрати інвертора в номінальному режимі становлять 4,58 кВт, а на один еквівалентний модуль припадає 1,53 кВт. Це формує усталене теплове навантаження, за якого температура переходу модуля досягає 111,4 °С. Такий рівень є нижчим за прийняте гранично допустиме значення 150 °С, отже в базовому сценарії інвертор працює без перевищення температурної межі. Разом із тим температурний запас становить лише 38,6 °С, що свідчить про наявність помірної, але вже відчутної теплонапруженості.

Для повнішої оцінки теплового стану доцільно визначити не лише температуру переходу, а й температури вздовж теплового шляху. За прийнятих значень теплових опорів отримаємо:

$$\Delta T_{j-c} = P_{mod} \cdot R_{th,jc} = 1527,8 \cdot 0,015 = 22,9^{\circ}C, \quad (3.1)$$

$$\Delta T_{c-h} = P_{mod} \cdot R_{th,ch} = 1527,8 \cdot 0,005 = 7,6^{\circ}C, \quad (3.2)$$

$$\Delta T_{h-a} = P_{mod} \cdot R_{th,ha} = 1527,8 \cdot 0,03 = 45,8^{\circ}C. \quad (3.3)$$

Тоді температури основних елементів становлять:

$$T_h = 35 + 45,8 = 80,8^{\circ}C,$$

$$T_c = 80,8 + 7,6 = 88,4^{\circ}C,$$

$$T_j = 88,4 + 22,9 = 111,4^{\circ}C.$$

Таким чином, у номінальному режимі найбільший температурний перепад формується на ділянці «охолоджувач – навколишнє середовище», а не всередині самого силового модуля. Це означає, що для базового сценарію визначальним фактором є не лише внутрішня теплостійкість силового ключа, а й ефективність відведення тепла від охолоджувача в довкілля.

Таблиця 3.1 – Температурні параметри силового модуля в номінальному режимі

Параметр	Позначення	Значення
Температура навколишнього середовища, °C	$T_a$	35,0
Температура охолоджувача, °C	$T_h$	80,8
Температура корпусу модуля, °C	$T_c$	88,4
Температура переходу, °C	$T_j$	111,4
Температурний запас, °C	$\Delta T_{res}$	38,6

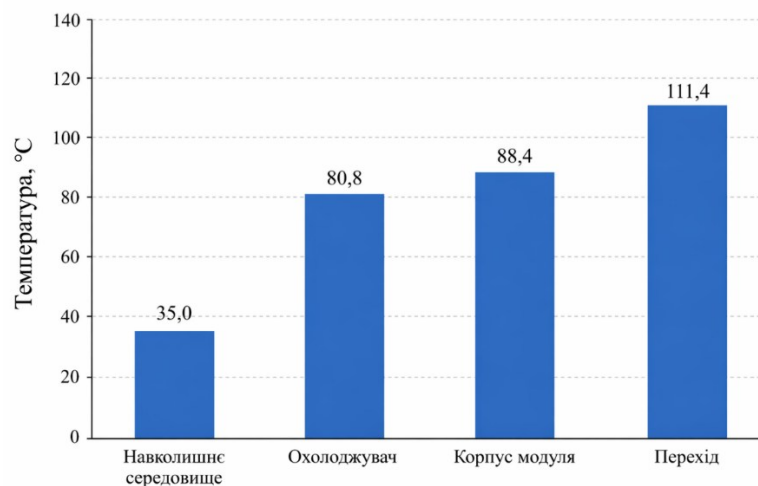


Рисунок 3.1 – Температури в характерних точках теплового шляху силового модуля в номінальному режимі

Розрахунок показує, що номінальний режим можна вважати базово допустимим, а отримані значення доцільно використовувати як опорні для подальших порівнянь з більш складними сценаріями роботи.

### 3.2 Аналіз теплових режимів при змінному навантаженні

Реальні умови експлуатації електромобіля не обмежуються усталеним номінальним режимом. У міському русі тяговий інвертор працює в умовах змінного навантаження, коли чергуються розгін, інтенсивне прискорення, короткочасне перевантаження, рекуперативне гальмування і повторно-короткочасні цикли. Саме тому для оцінки теплонапруженості силової електроніки необхідно перейти від стаціонарного сценарію до режимів змінного характеру.

У роботі розглянуто чотири додаткові сценарії:

1. інтенсивне прискорення при перевантаженні за струмом;
2. тривалий рух із підвищеним навантаженням;
3. повторно-короткочасний міський цикл;
4. рекуперативне гальмування.

Для режиму перевантаження, прийнятого на рівні  $1,2I_{nom}$ , у розділі 2 отримано сумарні втрати на модуль 2,05 кВт. В усталеному стані це відповідає температурі переходу  $137,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Уже саме це значення свідчить, що при підвищеному струмі силовий модуль переходить у передкритичну область, а температурний запас зменшується до  $12,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Однак для реального руху важливим є не лише усталене значення, а й час дії перевантаження. При інтенсивному прискоренні тривалістю  $20\text{ с}$  температура переходу зростає від  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $64,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Якщо ж перевантаження триває  $120\text{ с}$ , температура досягає  $123,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Отже, навіть короткочасний розгін

не виводить систему на критичний рівень, але тривале інтенсивне навантаження вже формує режим підвищеної теплонапруженості.

Для повторно-короткочасного міського циклу розглянуто послідовність із п'яти циклів: 20 с перевантаження та 40 с номінального режиму. У такому випадку температура переходу після кожного нового циклу зростає не з початкового рівня, а з уже накопиченого температурного фону. Максимальне значення температури в п'ятому циклі досягає  $122,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а наприкінці циклу температура залишається на рівні  $116,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Це означає, що в умовах міського руху значну роль відіграє саме теплове накопичення, а не лише пікове навантаження.

Для режиму рекуперативного гальмування, коли силовий модуль працює з меншими втратами, прийнято еквівалентне навантаження на рівні 55 % від номінальних втрат модуля. У такому випадку усталена температура переходу становить близько  $77,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Отже, рекуперативний режим у тепловому відношенні є значно менш напруженим, ніж режим тягового перевантаження.

Таблиця 3.2 – Температурні параметри силового модуля при змінному навантаженні

Режим роботи	Втрати на модуль, Вт	Температура переходу, $^{\circ}\text{C}$	Температурний запас, $^{\circ}\text{C}$	Оцінка режиму
Номінальний	1527,8	111,4	38,6	безпечний
Перевантаження $1,2 I_{nom}$ , усталений	2053,3	137,7	12,3	передкритичний
Інтенсивне прискорення, 20 с	2053,3	64,1	85,9	безпечний
Підвищене навантаження, 120 с	2053,3	123,8	26,2	напружений
Міський цикл, 5 повторів	змінні	122,1	27,9	напружений
Рекуперативне гальмування	840,3	77,0	73,0	безпечний

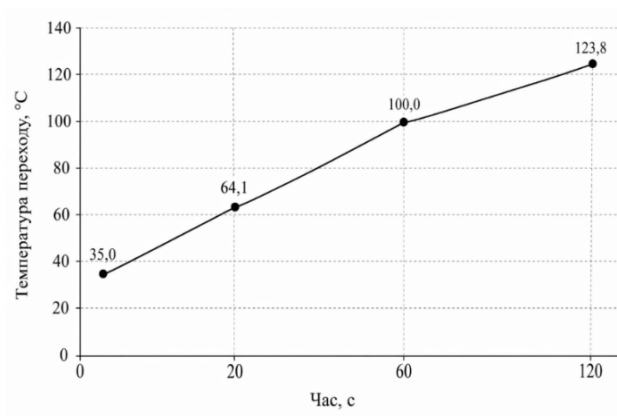


Рисунок 3.2 – Зміна температури переходу силового модуля при короткочасному перевантаженні

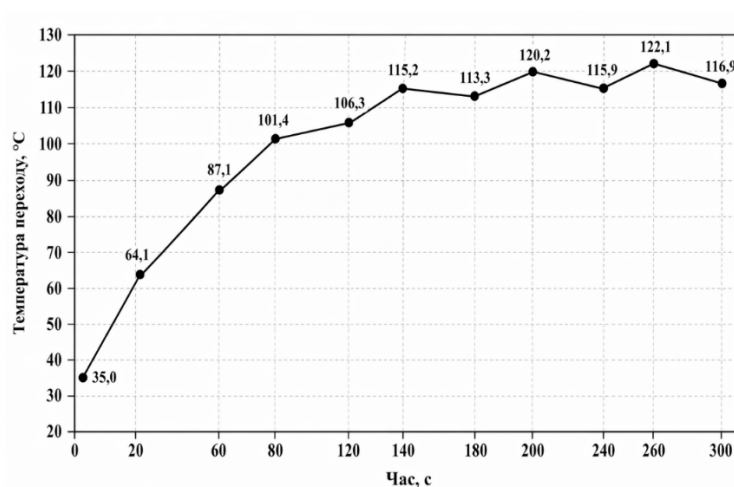


Рисунок 3.3 – Зміна температури переходу в повторно-короткочасному міському циклі

Отже, найбільш термічно напруженими серед змінних режимів є перевантаження під час інтенсивного руху та повторно-короткочасний міський цикл, у яких суттєвим стає ефект накопичення тепла.

### 3.3 Вплив параметрів охолодження на тепловий режим

Ефективність системи охолодження є одним із головних чинників, що визначають тепловий стан силового модуля. Навіть за однакових електричних втрат зміна теплового опору або температури довкілля може істотно змінити температуру переходу.

Для оцінки цього впливу в роботі розглянуто три групи факторів:

1. зміна теплового опору системи охолодження;
2. зміна температури навколишнього середовища;
3. погіршення теплового контакту.

У базовому варіанті прийнято:

$$R_{th,ja} = 0,05 \text{ К/Вт},$$

що відповідає ефективному рідинному охолодженню. Для моделювання погіршеного охолодження прийнято:

$$R_{th,ja} = 0,07 \text{ К/Вт}.$$

У цьому випадку температура переходу в номінальному режимі зростає до 141,9 °С, а температурний запас зменшується до 8,1 °С. Це означає, що навіть без збільшення навантаження система майже втрачає резерв теплостійкості.

Для умовного порівняння з повітряним охолодженням можна прийняти:

$$R_{th,ja} = 0,09 \text{ К/Вт}.$$

Тоді в номінальному режимі:

$$T_j = 35 + 1527,8 \cdot 0,09 = 172,5^\circ \text{C}.$$

Отримане значення перевищує допустиму межу 150 °С, що свідчить про непридатність такого рівня тепловідведення для розглянутого тягового інвертора при заданому навантаженні. Отже, для електромобіля класу Nissan LEAF ефективне рідинне охолодження є не просто бажаним, а фактично необхідним.

Окремо досліджено вплив температури довкілля. При збільшенні температури навколишнього середовища з 35 °С до 45 °С температура переходу в номінальному режимі зростає з 111,4 °С до 121,4 °С. Збільшення зовнішньої температури на 10 °С автоматично зменшує температурний запас

на ті ж  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Це особливо важливо для літньої експлуатації, руху в заторах та роботи силової електроніки в умовах обмеженого обдуву.

Вплив якості теплового контакту проявляється через збільшення внутрішнього теплового опору між корпусом модуля та охолоджувачем. Навіть помірне погіршення цієї ділянки призводить до підвищення температури корпусу і, відповідно, температури переходу. Це означає, що надійність термоінтерфейсного шару є практично не менш важливою, ніж номінальні параметри самого охолоджувача.

Таблиця 3.3 – Вплив параметрів охолодження на температуру переходу в номінальному режимі

Варіант охолодження	$R_{th,ja}$ , К/Вт	$T_a$ , $^{\circ}\text{C}$	$T_j$ , $^{\circ}\text{C}$	Температурний запас, $^{\circ}\text{C}$
Базове рідинне охолодження	0,05	35	111,4	38,6
Підвищена температура довкілля	0,05	45	121,4	28,6
Погіршене охолодження	0,07	35	141,9	8,1
Умовне повітряне охолодження	0,09	35	172,5	-22,5

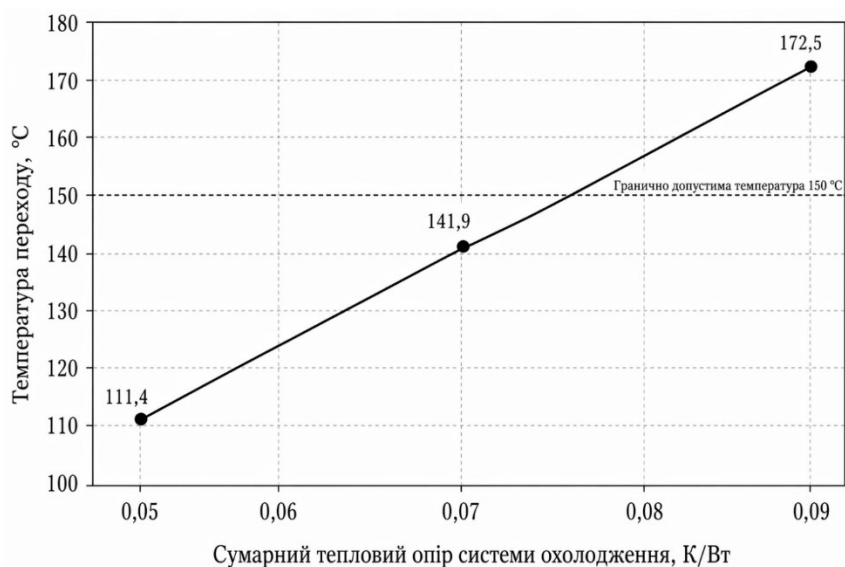


Рисунок 3.4 – Залежність температури переходу від сумарного теплового опору системи охолодження

Отже, найбільший вплив на зростання температури переходу має збільшення сумарного теплового опору системи охолодження. Саме цей фактор робить практичну частину дослідження інженерно значущою.

### 3.4 Порівняльна оцінка теплових режимів за різних умов експлуатації

Для узагальнення результатів дослідження доцільно виконати порівняння всіх розглянутих сценаріїв роботи тягового інвертора Nissan LEAF 40 kWh. Таке порівняння дозволяє виділити найбільш небезпечні режими та оцінити, які чинники є визначальними для перегріву силового модуля.

Таблиця 3.4 – Порівняльна оцінка теплових режимів тягового інвертора

№	Сценарій	$T_j, ^\circ\text{C}$	$\Delta T_{res}, ^\circ\text{C}$	Рівень ризику
1	Номінальний режим	111,4	38,6	безпечний
2	Інтенсивне прискорення, 20 с	64,1	85,9	безпечний
3	Підвищене навантаження, 120 с	123,8	26,2	напружений
4	Перевантаження $1,2 I_{nom}$ , усталений	137,7	12,3	передкритичний
5	Міський цикл, 5 повторів	122,1	27,9	напружений
6	Рекуперативне гальмування	77,0	73,0	безпечний
7	Висока температура довкілля	121,4	28,6	напружений
8	Погіршене охолодження	141,9	8,1	передкритичний
9	Умовне повітряне охолодження	172,5	-22,5	недопустимий

Порівняння показує, що найнебезпечнішими є три сценарії:

- погіршене охолодження;
- усталене струмове перевантаження;
- умовне повітряне охолодження.

При цьому якщо повітряне охолодження в даному прикладі взагалі виводить систему за допустиму температурну межу, то перевантаження і погіршення тепловідведення переводять її в передкритичний стан з мінімальним запасом надійності (рис. 3.5).

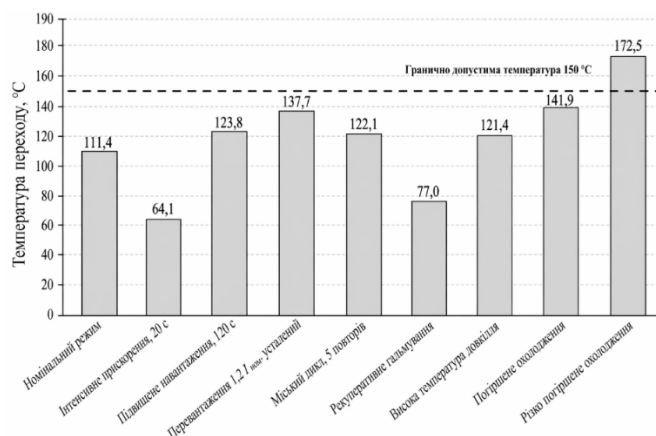


Рисунок 3.5 – Порівняння температури переходу силового модуля в різних режимах роботи

Порівняльна оцінка також показує, що не всі напружені режими пов'язані лише з великим струмом. Наприклад, підвищення температури докілька на 10 °C без зміни електричного навантаження погіршує тепловий стан майже так само, як тривалий міський цикл. Отже, перегрів силової електроніки формується внаслідок одночасної дії електричних і теплових факторів.

### 3.5 Рекомендації щодо підвищення теплової надійності силової електроніки електромобіля

Результати дослідження показали, що тепла надійність тягового інвертора Nissan LEAF 40 kWh визначається не лише абсолютним рівнем втрат потужності, а й здатністю системи охолодження відводити тепло в реальних експлуатаційних умовах. На цій підставі можна сформулювати низку практичних рекомендацій.

Першим напрямом є оптимізація режимів комутації. Для режимів інтенсивного навантаження доцільно застосовувати адаптивне керування частотою перемикачів, яке дозволяє зменшити комутаційні втрати в пікових режимах. Такий підхід особливо ефективний у сценаріях тривалого

перевантаження, коли саме накопичення тепла стає головною причиною зростання температури переходу. Подібні стратегії активно розглядаються в сучасних роботах з теплового менеджменту інверторів EV.

Другим напрямом є удосконалення системи охолодження. Оскільки найбільший внесок у температурний перепад у базовому режимі дає ділянка «охолоджувач – навколишнє середовище», доцільним є зменшення сумарного теплового опору саме цього контуру. Практично це означає підвищення ефективності рідинного охолодження, оптимізацію теплообмінника, поліпшення циркуляції охолоджувальної рідини та забезпечення стабільного теплового контакту між модулем і охолоджувачем. Огляд сучасних концепцій охолодження для автомобільних WBG-інверторів підтверджує, що вдосконалення охолоджувального контуру є одним із найефективніших способів підвищення теплової надійності.

Третім напрямом є використання сучасних напівпровідникових матеріалів і модулів з меншими втратами. Перехід до більш ефективних силових приладів дозволяє зменшити тепловиділення на тому самому рівні потужності. Разом з тим це не усуває необхідності якісного тепловідведення, а лише зменшує базовий рівень теплонапруженості. Огляди застосування SiC MOSFET у транспорті показують, що перспективність цих приладів поєднується з новими вимогами до пакування, ізоляції та охолодження.

Четвертим напрямом є контроль температури в реальному часі. Оскільки найбільш небезпечними є не лише усталені, а й перехідні та накопичувальні режими, доцільним є впровадження систем теплового моніторингу, які дозволяють відстежувати температуру силових модулів або її оцінку за непрямими параметрами під час руху. Це дає можливість своєчасно обмежувати перевантаження, знижувати частоту комутації або змінювати режим роботи електропривода при наблизенні до небезпечної межі.

П'ятим напрямом є резервування за температурою ще на етапі проектування. Результати розрахунків показали, що навіть при номінальному режимі та рідинному охолодженні температурний запас не є надмірним. Це

означає, що проєктні рішення повинні враховувати не лише штатний режим, а й експлуатацію при високій температурі довкілля, деградацію термоінтерфейсів і тимчасові перевантаження.

Отже, підвищення теплової надійності силовій електроніці електромобіля доцільно забезпечувати комплексно: через оптимізацію режимів комутації, зниження теплового опору системи охолодження, застосування сучасних силових приладів, організацію теплового моніторингу та створення достатнього температурного запасу.

### **Висновки до розділу 3**

У третьому розділі на прикладі тягового інвертора електромобіля Nissan LEAF 40 kWh досліджено теплові режими роботи силового модуля в номінальних, змінних та ускладнених умовах експлуатації. Встановлено, що в номінальному режимі температура переходу становить 111,4 °C, що відповідає допустимому рівню, однак не забезпечує великого температурного запасу. Найбільш термічно напруженими виявилися режими струмового перевантаження, погіршеного охолодження та тривалого змінного навантаження, за яких температура переходу наближається до гранично допустимої межі 150 °C.

Показано, що вирішальний вплив на перегрів силового модуля мають не лише електричні втрати, а й параметри системи охолодження та температура навколишнього середовища. Зокрема, збільшення сумарного теплового опору від 0,05 до 0,07 К/Вт зменшує температурний запас до 8,1 °C, а умовне повітряне охолодження взагалі призводить до перевищення допустимої температури. На підставі отриманих результатів обґрунтовано доцільність удосконалення рідинного охолодження, застосування адаптивного керування тепловими режимами, контролю температури в реальному часі та забезпечення достатнього температурного резерву при проєктуванні силовій електроніці електромобіля.

## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ

### 4.1 Вступ

Питання охорони праці під час дослідження теплових режимів силової електроніки електромобіля є невід'ємною складовою бакалаврської кваліфікаційної роботи, оскільки виконання таких досліджень пов'язане з дією комплексу небезпечних і шкідливих виробничих факторів. До них належать підвищене значення напруги в електричних колах, можливість ураження електричним струмом, небезпека коротких замикань, нагріті поверхні силових модулів та охолоджувальних елементів, електромагнітні впливи, а також ризики, зумовлені експлуатацією високовольтних акумуляторних систем [15 – 19].

Правові та організаційні засади забезпечення безпечних умов праці визначаються Законом України «Про охорону праці», відповідно до якого під час виконання робіт повинні бути створені умови, що виключають або максимально обмежують вплив небезпечних і шкідливих чинників на працівника [15]. Для робіт, пов'язаних з дослідженням і обслуговуванням електротехнічних установок, особливого значення набуває дотримання вимог правил безпечної експлуатації електроустановок, норм використання електрозахисних засобів, вимог пожежної безпеки, а також санітарних норм щодо мікроклімату, шуму, електромагнітних випромінювань та умов праці в приміщеннях з електронним і електротехнічним обладнанням [20 – 24].

Метою цього розділу є аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів, що можуть виникати під час дослідження та обслуговування силової електроніки електромобіля, а також розробка організаційних і технічних заходів, спрямованих на забезпечення електробезпеки, теплової безпеки, пожежного захисту та належних санітарно-гігієнічних умов праці. Окрему увагу приділено обґрунтуванню практичних рішень, пов'язаних із безпекою робочого місця, вентиляцією, безпечним використанням вимірювальної

апаратури та запобіганням аварійним режимам роботи силового обладнання [25, 16, 23, 24, 26].

#### **4.2 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів при дослідженні та обслуговуванні силової електроніки електромобіля**

Дослідження теплових режимів силової електроніки електромобіля пов'язане з роботою у високовольтних колах, використанням силових напівпровідникових модулів, джерел живлення, вимірювальної апаратури та допоміжного комп'ютерного обладнання. За таких умов на робочому місці виникає комплекс небезпечних і шкідливих виробничих факторів, які потребують системного аналізу та врахування під час організації експериментальних і лабораторних робіт. Загальні вимоги щодо створення безпечних умов праці, обов'язків роботодавця і працівника, а також забезпечення засобами захисту визначені Законом України «Про охорону праці» [15].

До найбільш небезпечних факторів належить ураження електричним струмом. У процесі дослідження тягового інвертора або окремих силових модулів працівник може контактувати з колами підвищеної напруги, замикання яких через тіло людини становить безпосередню загрозу життю та здоров'ю. Особливу небезпеку створюють пошкодження ізоляції, випадковий дотик до струмовідних частин, неправильне підключення вимірювальних приладів, а також помилки під час комутації елементів стенда. Вимоги до безпечної експлуатації електроустановок і організації робіт у них установлені правилами безпечної експлуатації електроустановок [16 - 21].

Другим небезпечним фактором є дія високих температур. Під час роботи інвертора, особливо в режимах перевантаження або недостатнього охолодження, температури силових модулів, шин, радіаторів та суміжних елементів можуть досягати значень, небезпечних як для людини, так і для

надійності обладнання. Контакт з нагрітими поверхнями може спричинити термічні опіки, а локальний перегрів елементів здатен викликати пошкодження ізоляції, деформацію контактів і пожежонебезпечні режими.

Третім фактором є можливість короткого замикання в силових колах. Для систем силової електроніки електромобіля характерні значні струми, тому аварійне коротке замикання супроводжується різким виділенням тепла, електричною дугою, руйнуванням напівпровідникових елементів і ризиком займання. У зв'язку з цим під час роботи з інвертором необхідно забезпечувати справність ізоляції, правильний вибір захисної апаратури та наявність аварійного вимкнення [16 - 21].

Четвертим шкідливим фактором є електромагнітні впливи. Комутація силових елементів інвертора супроводжується виникненням імпульсних електромагнітних завад, які можуть впливати на оператора, засоби вимірювання та системи реєстрації даних. Вимоги щодо захисту від електромагнітних випромінювань визначаються санітарними нормами [21].

П'ятим чинником є небезпека, пов'язана з роботою з акумуляторними системами. Високовольтна батарея електромобіля є джерелом постійної напруги, небезпечної при дотику та аварійних режимах. Додаткову загрозу створюють можливі термічні та електрохімічні процеси в батарейному контурі, особливо за порушення режимів заряджання, розряджання або охолодження.

До супутніх шкідливих факторів належать підвищена температура повітря робочої зони, недостатня освітленість, шум від вентиляційного та електротехнічного обладнання, а також зорове й нервово-емоційне напруження при роботі з електронною апаратурою та екранами комп'ютерів.

Отже, під час дослідження та обслуговування силової електроніки електромобіля на працівника одночасно діють електричні, теплові, електромагнітні, пожежні та психофізіологічні фактори, що обумовлює необхідність розробки комплексу організаційних і технічних заходів безпеки.

### **4.3 Вимоги безпеки при роботі з електронними та силовими електротехнічними установками**

Безпечна робота з електронними та силовими електротехнічними установками повинна ґрунтуватися на поєднанні організаційних і технічних заходів. До організаційних заходів належать допуск до робіт лише підготовленого персоналу, проведення інструктажів, навчання і перевірки знань з охорони праці, встановлення порядку безпечного виконання робіт, а також призначення відповідальних осіб [15, 27].

До технічних заходів належать справна ізоляція струмовідних частин, застосування захисного заземлення, огороження відкритих контактів, використання електрозахисних засобів, наявність попереджувальних плакатів, блокувальних пристроїв та аварійного вимкнення живлення.

Під час виконання вимірювань на силових колах необхідно застосовувати справні вимірювальні прилади з ізольованими проводами та щупами, діелектричні рукавички, ізолювальні килимки, захисні окуляри та інші засоби індивідуального захисту. Забороняється виконувати перепідключення елементів схеми під напругою, залишати стенд без нагляду під час роботи в навантажених режимах, а також використовувати несправне електрообладнання. При дослідженні електронних систем з використанням персонального комп'ютера слід також дотримуватися санітарних вимог до роботи з відеодисплейними терміналами.

Особливе значення має порядок допуску до роботи. Особи, які виконують дослідження силових електронних установок, повинні пройти навчання з питань охорони праці та мати відповідну групу з електробезпеки. Експлуатація електроустановок без організації контролю за станом ізоляції, заземленням і засобами захисту є неприпустимою.

Отже, безпека роботи з силовою електронікою електромобіля забезпечується лише за умови поєднання технічного захисту, належної

організації праці, спеціальної підготовки персоналу та неухильного дотримання правил електробезпеки.

#### **4.4 Заходи щодо забезпечення безпечних умов праці під час експериментальних або лабораторних досліджень**

Лабораторні дослідження силової електроніки повинні проводитися в приміщенні, яке відповідає вимогам до електробезпеки, мікроклімату, освітлення та пожежного захисту. Робоче місце має бути організоване таким чином, щоб оператор мав вільний доступ до органів керування, аварійного вимкнення живлення та вимірювальної апаратури, але не перебував у зоні прямого контакту з нагрітими або струмовідними частинами стенда.

Мікроклімат приміщення повинен відповідати санітарним нормам [9, 10]. За підвищених тепловиділень від інвертора, радіаторів і допоміжної апаратури необхідно забезпечити ефективне відведення тепла. Для цього застосовується припливно-витяжна вентиляція, яка підтримує допустиму температуру повітря в робочій зоні та зменшує ризик додаткового перегріву обладнання.

Освітлення робочого місця повинно відповідати вимогам будівельних норм [25]. Освітленість має бути достатньою для чіткого сприйняття маркування, показів приладів, схем підключення та стану контактів. Недостатнє освітлення підвищує ризик помилок при виконанні комутаційних операцій і під час зняття показів. Належний рівень освітлення є також важливим з погляду зниження зорової втоми оператора.

Протипожежні заходи повинні включати наявність справних вогнегасників, використання негорючих основ під силовим обладнанням, відсутність сторонніх горючих матеріалів поблизу стенда, утримання вільними шляхів евакуації та постійний контроль температурного стану елементів установки. Для приміщення з дослідженням силової електроніки

доцільно використовувати вуглекислотні або порошкові вогнегасники, придатні для гасіння електрообладнання, що перебуває під напругою.

Аварійне відключення живлення повинно бути організоване у вигляді окремого вимикача або кнопки аварійної зупинки, розташованої в зоні швидкого доступу оператора. Усі дослідження в режимах перевантаження повинні проводитися за заздалегідь визначеним алгоритмом з контролем температури та часу дії навантаження. Вимірювальна апаратура має використовуватися лише за її прямим призначенням, з урахуванням категорії безпеки, допустимої напруги та цілісності ізоляції вимірювальних кіл.

Таким чином, безпечні умови праці під час лабораторних досліджень силової електроніки забезпечуються за рахунок правильного облаштування робочого місця, нормалізації мікроклімату, достатнього освітлення, протипожежного захисту, наявності аварійного вимкнення та безпечного використання вимірювальної техніки.

## **4.5 Розрахунок та оцінка окремих заходів охорони праці**

### **4.5.1 Розрахунок необхідного повітрообміну лабораторного приміщення**

Оскільки тематика роботи пов'язана з дослідженням теплових режимів силової електроніки, доцільним є розрахунок вентиляції лабораторного приміщення за надлишковими тепловиділеннями. Прийmemo розміри приміщення  $6 \times 4 \times 3$  м. Тоді його об'єм становить:

$$V=S \cdot A \cdot B=6 \cdot 4 \cdot 3=72 \text{ м}^3. \quad (4.1)$$

Для лабораторного стенда приймаємо такі тепловиділення:

- стенд дослідження силової електроніки – 800 Вт;
- джерело живлення та вимірювальна апаратура – 250 Вт;
- персональний комп'ютер і монітор – 100 Вт;
- оператор – 130 Вт.

Тоді загальні надлишкові тепловиділення:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 = 800 + 250 + 100 + 130 = 1280 \text{ Вт.} \quad (4.2)$$

де  $Q$  – сумарні надлишкові тепловиділення в приміщенні, Вт;

$Q_1$  – тепловиділення від стенда дослідження силової електроніки, Вт ( $Q_1 = 800$  Вт – стенд дослідження силової електроніки);

$Q_2$  – тепловиділення від джерела живлення та вимірювальної апаратури, Вт ( $Q_2 = 250$  Вт – джерело живлення та вимірювальна апаратура);

$Q_3$  – тепловиділення від персонального комп'ютера і монітора, Вт ( $Q_3 = 100$  Вт – комп'ютер і монітор);

$Q_4$  – тепловиділення від людини-оператора, Вт ( $Q_4 = 30$  Вт – тепловиділення оператора).

Необхідну витрату повітря визначаємо за формулою:

$$L = \frac{3.6Q}{\rho c_p \Delta t}, \quad (4.3)$$

де  $L$  – необхідний повітрообмін, м<sup>3</sup>/год;

$Q$  – надлишкові тепловиділення, Вт;

$\rho = 1.2 \text{ кг/м}^3$  – густина повітря;

$c_p = 1005 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{°C)}$  – питома теплоємність повітря;

$\Delta t = 5^\circ\text{C}$  – допустиме підвищення температури повітря в приміщенні.

Підставляємо значення:

$$L = \frac{3.6 \cdot 1280}{1.2 \cdot 1005 \cdot 5} = \frac{4608}{6030} \approx 764 \text{ м}^3/\text{год.}$$

Кратність повітрообміну:

$$n = \frac{L}{V} = \frac{764}{72} \approx 10.6 \text{ год}^{-1}. \quad (4.4)$$

Отже, для лабораторного приміщення, у якому проводяться дослідження теплових режимів силової електроніки електромобіля, необхідно забезпечити повітрообмін не менше 760–800 м<sup>3</sup>/год, що відповідає кратності близько 10–

11 разів за годину. Такий повітрообмін забезпечує відведення надлишкового тепла, сприяє підтриманню допустимого мікроклімату та зменшує ризик перегріву обладнання.

#### 4.5.2 Оцінка потреби у первинних засобах пожежогасіння

З огляду на наявність електрообладнання та дослідження у теплонапружених режимах лабораторне приміщення повинно бути забезпечене первинними засобами пожежогасіння [23, 24]. Для приміщення площею

$$S=A \cdot B=6 \cdot 4=24 \text{ м}^2 \quad (4.5)$$

і наявності електрообладнання доцільно передбачити не менше одного вуглекислотного або порошкового вогнегасника, придатного для гасіння електроустановок, а також вільний доступ до нього. Такий підхід відповідає загальним вимогам правил пожежної безпеки та типових норм належності вогнегасників [23].

### **Висновки до розділу з охорони праці**

У розділі встановлено, що під час дослідження теплових режимів силової електроніки електромобіля основними небезпечними і шкідливими виробничими факторами є ураження електричним струмом, дія високих напруг у силових колах, нагріті поверхні силових модулів, можливість короткого замикання, електромагнітні впливи, а також ризики, пов'язані з експлуатацією високовольтних акумуляторних систем.

Показано, що безпечне виконання лабораторних досліджень можливе лише за умови дотримання комплексу організаційних і технічних заходів:

належного допуску до робіт, використання електрозахисних засобів, заземлення та ізоляції обладнання, контролю температурних режимів, забезпечення достатнього освітлення, вентиляції та пожежного захисту.

Розрахунок вентиляції лабораторного приміщення показав, що для відведення надлишкових тепловиділень від стенда і допоміжного обладнання необхідно забезпечити повітрообмін приблизно  $764 \text{ м}^3/\text{год}$ , що відповідає кратності близько  $10.6 \text{ год}^{-1}$ . Це підтверджує, що вимоги електробезпеки, теплової безпеки, належного мікроклімату та пожежного захисту є безпосередньо пов'язаними з темою роботи та повинні розглядатися як обов'язкова умова безпечного проведення досліджень.

## ВИСНОВКИ

У роботі вирішено актуальне науково-прикладне завдання, що полягає в дослідженні теплових режимів роботи силової електроніки електромобіля на прикладі тягового інвертора Nissan LEAF 40 kWh. Актуальність теми обумовлена тим, що силова електроніка є однією з найбільш теплонапружених підсистем електромобіля, а її температурний стан безпосередньо впливає на енергоефективність, надійність, ресурс і безпеку роботи тягового електропривода.

У першому розділі виконано аналіз силової електроніки електромобіля як об'єкта дослідження та умов її теплового навантаження. Встановлено, що ключову роль у формуванні теплового стану відіграють тяговий інвертор, силові напівпровідникові модулі, система охолодження та режими експлуатації транспортного засобу. На основі аналізу навчальних і наукових джерел показано, що, попри значну кількість досліджень у галузі теплового менеджменту, проблема комплексної оцінки теплових режимів силової електроніки в реальних умовах руху залишається недостатньо розв'язаною. Особливої уваги потребує врахування змінних навантажень, перехідних процесів, температури довкілля та ефективності тепловідведення.

У другому розділі розроблено модель та методику дослідження теплових режимів силової електроніки. Як об'єкт дослідження обрано тяговий інвертор електромобіля Nissan LEAF 40 kWh, а як розрахунковий елемент – еквівалентний силовий модуль одного плеча інвертора. На основі відкритих технічних даних транспортного засобу та прийнятих розрахункових припущень визначено вихідні параметри моделі. Сформовано математичну основу, яка встановлює зв'язок між електричним навантаженням, втратами потужності та температурним станом силового модуля. Побудовано спрощений тепловий ланцюг «перехід – корпус – охолоджувач – навколишнє середовище» та розроблено послідовну методику оцінювання температурних режимів для характерних сценаріїв експлуатації. Також визначено критерії

оцінки ефективності теплового режиму, серед яких основними є температура переходу, температурний запас, динаміка нагріву та рівень теплонапруженості.

У третьому розділі виконано безпосереднє дослідження теплових режимів та оцінку ефективності роботи силової електроніки. Встановлено, що в номінальному режимі температура переходу силового модуля становить 111,4 °С, що відповідає допустимому рівню, однак не забезпечує значного температурного запасу. Показано, що у випадку струмового перевантаження, тривалого підвищеного навантаження, повторно-короткочасного міського циклу, підвищеної температури довкілля та погіршеного охолодження температура переходу істотно зростає. Найбільш небезпечними виявилися режими усталеного перевантаження та погіршеного охолодження, при яких температура переходу наближається до гранично допустимого значення 150 °С, а температурний запас зменшується до критично малих величин. Установлено, що вирішальний вплив на перегрів модуля мають не лише електричні втрати, а й сумарний тепловий опір системи охолодження та температура навколишнього середовища.

Порівняльний аналіз різних режимів роботи показав, що навіть за однакової потужності інвертора тепловий стан силового модуля може суттєво відрізнятися залежно від характеру навантаження та ефективності тепловідведення. Доведено, що для електромобіля такого класу рідинне охолодження є технічно необхідним, тоді як різке погіршення тепловідведення переводить систему в передкритичний або недопустимий режим. На підставі отриманих результатів обґрунтовано доцільність оптимізації режимів комутації, підвищення ефективності охолодження, впровадження теплового моніторингу та забезпечення достатнього температурного резерву на етапі проектування силової електроніки.

У розділі з охорони праці проаналізовано небезпечні й шкідливі виробничі фактори, характерні для дослідження та обслуговування силової електроніки електромобіля. Визначено, що основними з них є високі напруги

в силових колах, можливість ураження електричним струмом, нагріті поверхні силових модулів, небезпека коротких замикань, електромагнітні впливи та ризики, пов'язані з високовольтними акумуляторними системами. Запропоновано організаційні й технічні заходи щодо забезпечення безпечних умов праці. Виконаний розрахунок вентиляції лабораторного приміщення показав необхідність забезпечення повітрообміну на рівні близько 764 м<sup>3</sup>/год для відведення надлишкових тепловиділень від дослідного стенда та допоміжного обладнання.

Отже, у роботі підтверджено, що теплова надійність силової електроніки є одним із визначальних чинників ефективної та безпечної експлуатації електромобіля. Розроблений підхід до моделювання й оцінювання теплових режимів дозволяє виявляти найбільш небезпечні режими роботи тягового інвертора та може бути використаний для подальшого вдосконалення систем теплового менеджменту, алгоритмів керування і засобів моніторингу стану силової електроніки електромобілів.

Результати роботи апробовано на IV ВСЕУКРАЇНСЬКІЙ НАУКОВО-ПРАКТИЧНІЙ КОНФЕРЕНЦІЇ «ЕНЕРГЕТИКА КРИЗЬ ПРИЗМУ ЧАСУ: ІСТОРИЧНА СПАДЩИНА ТА СТРАТЕГІЇ ПОВОЄННОГО ВІДНОВЛЕННЯ». Секція 1. Технологічний прорив: від механічних систем до цифрової інженерії та робототехніки. 14 ТРАВНЯ 2026. - ВСП «Бурштинський енергетичний фаховий коледж ІВАНО-ФРАНКІВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ НАФТИ І ГАЗУ» [25].

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Закладний О. М., Прокопенко В. В., Закладний О. О. Електропривод : навч. посіб. Київ : НТУУ «КПІ», 2008. 316 с. URL: <https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/56294/1/Elektropryvod.pdf>
2. Денисюк С. П., Белоха Г. С. Системи силової електроніки та засоби керування в електроенергетиці. Силова електроніка в системах електроживлення : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 130 с. URL: [https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/57370/1/Systemy\\_sylovoi\\_elektroniky\\_Posibnyk.pdf](https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/57370/1/Systemy_sylovoi_elektroniky_Posibnyk.pdf)
3. Power Electronics for Electric Vehicles and Energy Storage / ed. by D. Kishan, R. Kannan, B. Dastagiri Reddy, P. Prabhakaran. Boca Raton : CRC Press, 2024. URL: [https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9781000873429\\_A45688588/preview-9781000873429\\_A45688588.pdf](https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9781000873429_A45688588/preview-9781000873429_A45688588.pdf)
4. Qian C., Gheitaghy A. M., Fan J., Tang H., Sun B., Ye H., Zhang G. Thermal Management on IGBT Power Electronic Devices and Modules. IEEE Access. 2018. Vol. 6. P. 12868–12884. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2793300. URL: [https://www.researchgate.net/publication/322515037\\_Thermal\\_Management\\_on\\_IGBT\\_Power\\_Electronic\\_Devices\\_and\\_Modules/fulltext/5a5d4d62a6fdcc68fa96f85c/Thermal-Management-on-IGBT-Power-Electronic-Devices-and-Modules.pdf](https://www.researchgate.net/publication/322515037_Thermal_Management_on_IGBT_Power_Electronic_Devices_and_Modules/fulltext/5a5d4d62a6fdcc68fa96f85c/Thermal-Management-on-IGBT-Power-Electronic-Devices-and-Modules.pdf)
5. Shi B., Ramones A. I., Liu Y., Wang H., Li Y., Pischinger S., Andert J. A review of silicon carbide MOSFETs in electrified vehicles: Application, challenges, and future development. IET Power Electronics. 2023. Vol. 16, No. 12. P. 2103–2120. DOI: 10.1049/pel2.12524. URL: [https://www.researchgate.net/publication/370836518\\_A\\_review\\_of\\_silicon\\_carbide\\_MOSFETs\\_in\\_electrified\\_vehicles\\_Application\\_challenges\\_and\\_future\\_development](https://www.researchgate.net/publication/370836518_A_review_of_silicon_carbide_MOSFETs_in_electrified_vehicles_Application_challenges_and_future_development)

6. Urkizu J., Mazuela M., Alacano A., Aizpuru I., Chakraborty S., Hegazy O., Vetten M., Klink R. Electric Vehicle Inverter Electro-Thermal Models Oriented to Simulation Speed and Accuracy Multi-Objective Targets. *Energies*. 2019. Vol. 12, No. 19. Art. 3608. DOI: 10.3390/en12193608. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/19/3608>.
7. Hanini W., Mahfoudhi S., Ayadi M. Development of Electrothermal Models for Electrical Traction. *World Electric Vehicle Journal*. 2022. Vol. 13, No. 2. Art. 39. DOI: 10.3390/wevj13020039. URL: <https://www.mdpi.com/2032-6653/13/2/39>
8. Rasool H., El Baghdadi M., Rauf A. M., Zhaksylyk A., D'hont T., Sarrazin M., Hegazy O. Accurate Electro-Thermal Computational Model Design and Validation for Inverters of Automotive Electric Drivetrain Applications. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12, No. 11. Art. 5593. DOI: 10.3390/app12115593. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/11/5593>
9. Trancho E., Ibarra E., Prieto P., Arias A., Lis A., Pai A. P. Novel Thermal Management Strategy for Improved Inverter Reliability in Electric Vehicles. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10, No. 22. Art. 8024. DOI: 10.3390/app10228024. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/22/8024>
10. Abramushkina E., Zhaksylyk A., Geury T., El Baghdadi M., Hegazy O. A Thorough Review of Cooling Concepts and Thermal Management Techniques for Automotive WBG Inverters: Topology, Technology and Integration Level. *Energies*. 2021. Vol. 14, No. 16. Art. 4981. DOI: 10.3390/en14164981. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/16/4981>
11. Previati G., Mastinu G., Gobbi M. Thermal Management of Electrified Vehicles—A Review. *Energies*. 2022. Vol. 15, No. 4. Art. 1326. DOI: 10.3390/en15041326. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/4/1326>
12. Li B., Kuo H., Wang X., Chen Y., Wang Y., Gerada D., Worall S., Stone I., Yan Y. Thermal Management of Electrified Propulsion System for Low-Carbon Vehicles. *Automotive Innovation*. 2020. Vol. 3. P. 299–316. DOI: 10.1007/s42154-020-00124-y. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42154-020-00124-y>

13. Nissan. 2022 Nissan LEAF brochure [Electronic resource]. URL: <https://www.nissanusa.com/content/dam/Nissan/us/vehicle-brochures/2022/2022-nissan-nissan-leaf-brochure-en.pdf>
14. Nissan. 2022 LEAF Dismantling Guide [Electronic resource]. URL: <https://www.nissanusa.com/content/dam/Nissan/us/manuals-and-guides/leaf/2022/2022-nissan-leaf-dismantling-guide.pdf>
15. Закон України «Про охорону праці» : Закон України від 14.10.1992 № 2694-XII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12>
16. НПАОП 40.1-1.01-97. Правила безпечної експлуатації електроустановок. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0011-98>
17. НПАОП 40.1-1.07-01. Правила експлуатації електрозахисних засобів. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1237-01>
18. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0093-98>
19. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id\\_doc=27607](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=27607)
20. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/va042282-99#Text>
21. ДСанПіН 3.3.6.096-2002. Державні санітарні норми і правила захисту населення від впливу електромагнітних випромінювань. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0203-03>
22. НПАОП 0.00-4.12-05. Типове положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0231-05>
23. НАПБ А.01.001-2014 Правила пожежної безпеки в Україні. URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=60541](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=60541)
24. НАПБ Б.01.008-2018 Правила експлуатації та типові норми належності вогнегасників. URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=82176](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=82176)
25. Кучинський В. С., Камнев О. О., Розінков І. О. ІНТЕГРАЦІЯ

ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ В ЕНЕРГОСИСТЕМУ МІСТА:  
ЕЛЕКТРОМАГНІТНА СУМІСНІСТЬ ТА ТЕПЛОВІ РЕЖИМИ СИЛОВОЇ  
ЕЛЕКТРОНІКИ // IV ВСЕУКРАЇНСЬКА НАУКОВО-ПРАКТИЧНА  
КОНФЕРЕНЦІЯ «ЕНЕРГЕТИКА КРІЗЬ ПРИЗМУ ЧАСУ: ІСТОРИЧНА  
СПАДЩИНА ТА СТРАТЕГІЇ ПОВОЄННОГО ВІДНОВЛЕННЯ». Секція 1.  
Технологічний прорив: від механічних систем до цифрової інженерії та  
робототехніки. 14 ТРАВНЯ 2026. - ВСП «Бурштинський енергетичний  
фаховий коледж ІВАНО-ФРАНКІВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО  
ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ НАФТИ І ГАЗУ».  
[https://drive.google.com/drive/folders/1G1Y9DdeY\\_3--  
mzS\\_R34WZCXADiusV58p](https://drive.google.com/drive/folders/1G1Y9DdeY_3--mzS_R34WZCXADiusV58p)