

Теплове моделювання для систем швидкого заряджання високої потужності електромобіля

Тенденції до підвищення автономності та потужності двигуна матимуть великий вплив на електронну архітектуру майбутніх транспортних засобів. Наступне покоління таких пристроїв генеруватиме, оброблятиме і передаватиме набагато більше даних, ніж нинішні транспортні засоби. Водночас збільшення потужності за великих струмів призведе до генерації у високовольтному тракті сильних електромагнітних полів, що можуть наводити завади в сусідніх сигнальних лініях, а ті, своєю чергою, стати причиною збою в роботі електронних систем електромобіля.

ВАЖЛИВІСТЬ РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМ ЗАРЯДЖАННЯ ВИСОКОЇ ПОТУЖНОСТІ

Нові бізнес-моделі з використанням електромобілів стануть прибутковими тільки в тому разі, якщо транспорт постійно перебуватиме в активному використанні. Для цього їм необхідне швидке заряджання, порівнянне за часом із заправкою автомобілів із двигунами внутрішнього згоряння. Вирішити цю проблему може підвищення зарядної потужності до 350 кВт. У цьому разі заряд батареї електромобіля за порівнянний час, тобто, за кілька хвилин, забезпечить його пробіг на 300 км.

Однак збільшення потужності до 350 кВт за напруги 700 В потребуватиме генерації струму на рівні до 500 А, що спричинить відповідні теплові втрати не лише в системі перетворення енергії, а й у системі її передавання — роз'ємах і кабелях. Проблема ще й у тому, що теплові втрати на контактних з'єднаннях спричиняють зростання опору, що, відповідно до закону Джоуля-Ленца, призводить до підвищення тепловиділення і цей процес може призвести до критичної, а потім катастрофічної ситуації відмови системи. Відповідно, під час проектування і розрахунку електропровідних компонентів, щоб уникнути їхнього перевантаження і перегріву, теплові втрати необхідно аналізувати та враховувати. Крім того, у разі перегріву батареї для захисту акумулятора відбу-

вається контрольоване зниження струму і, відповідно, потужності заряджання, але це подовжує час зарядного циклу.

ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕПЛОВИХ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМ ЗАРЯДЖАННЯ ВИСОКОЇ ПОТУЖНОСТІ

Завдання з оптимізації терморегулювання можна вирішити за допомогою безперервного прогнозування поточного стану всіх компонентів у кожній системі електромобіля.

Високий зарядний струм, який наявний під час заряджання високою потуж-

ністю, є станом пікового навантаження для електричної системи електромобіля. Інших режимів експлуатації, за яких відбувається такий тривалий граничний потік енергії, як між точкою заряджання і транспортним засобом, не існує. Навіть під час агресивного водіння, коли водій використовує великі потужності двигуна, навантаження до подібної величини споживання енергії не наближається. Високий зарядний струм спричиняє різке та значне підвищення температури всіх залучених у цьому процесі компонентів, що стає більшою проблемою, коли транспортний засіб не рухається і для охолодження відсутня конвекція. Отже, для забезпечення високопотужного заряджання необхідно спроектувати та визначити електричні та теплові характеристики всієї системи від точки заряджання до акумуляторної батареї автомобіля.

Основним вирішенням цієї проблеми є збільшення поперечного перерізу кабелю. Це дає змогу без перегріву передавати необхідну потужність за того самого значення напруги. Однак, всередині автомобіля це насамперед питання ваги і доступного простору. У цьому плані, для передачі такої ж кількості

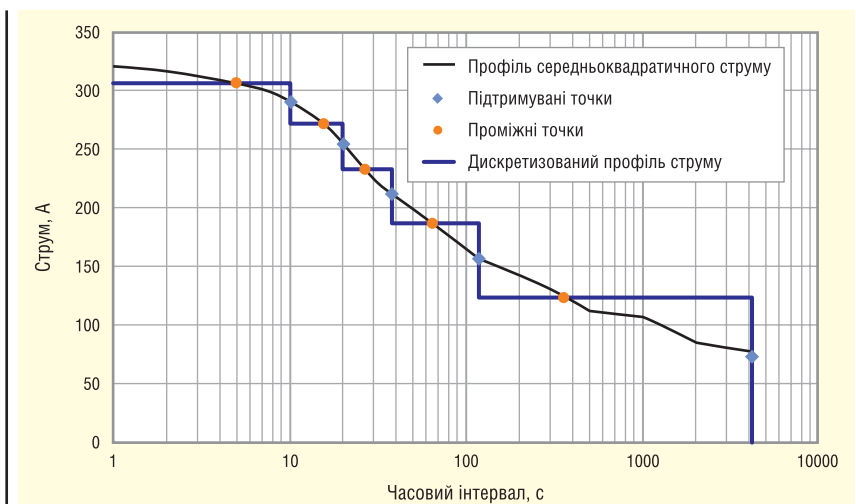


Рис. 1. Фактичний середньоквадратичний і дискретний профіль зарядного струму

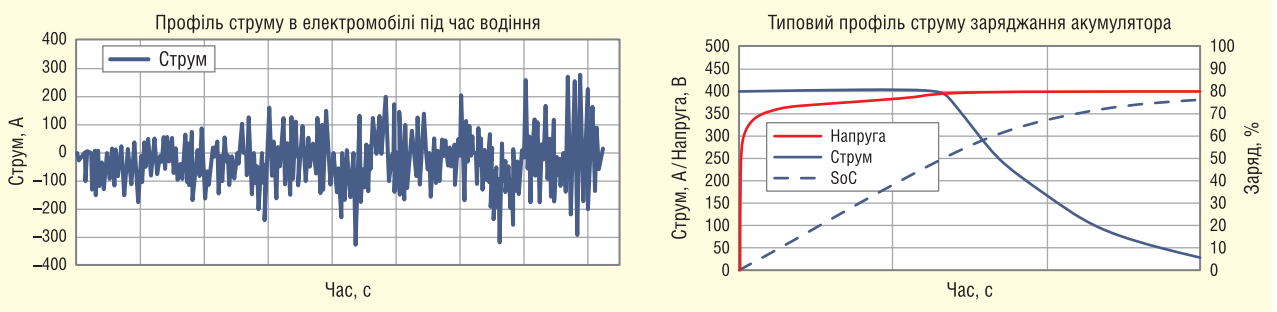


Рис. 2. Профіль зміни споживання струму в процесі водіння порівняно з профілем струму при високопотужному швидкому заряджанні

енергії за нижчого рівня струму, найкращим варіантом є збільшення напруги. Це пояснює, чому деякі виробники обладнання планують перейти з систем 400 В на системи 800 В, адже для того, щоб високопотужне заряджання стало реалістичною пропозицією, необхідно уникати надмірного збільшення перерізу кабелю та високого струмового навантаження для всіх інших електричних компонентів.

СУЧАСНІ РІШЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ КОМПОНЕНТІВ

Доступні на сьогодні способи проектування електричних компонентів сильнострумових кіл не підходять ні для динамічного навантаження під час водіння, ні для вимог високопотужного заряджання. Наявні стандарти ґрунтуються на точках статичного навантаження, які визначаються статистичними методами, що відображають частоту їхнього виникнення та пріоритет. Результатом є середньоквадратичні значення, що відображають статичні умови (рис. 1).

Компоненти, спроектовані відповідно до такого профілю навантаження, отримують додатковий технологічний запас міцності, наприклад, у 20%. Однак фактичний профіль навантаження в електромобілі, наведений на рисунку 2, сильно різко відрізняється від даних середньоквадратичних значень. Дивлячись на ці графіки стає зрозуміло, чому тепловий аналіз для процесу заряджання має настільки велике значення.

Для забезпечення заряджання потужністю 350 кВт потрібен інший підхід до проектування електричних компонентів, оскільки в процесі водіння навантаження змінюється динамічно, але не досягає пікових значень процесу заряджання. Під час водіння енергія батареї витрачається протягом кількох годин, а під час високопотужного заряджання

вона має заповнитися за кілька хвилин. Відповідно, весь високовольний і високострумовий тракт, для розуміння його поведінки під час заряджання, має бути проаналізовано на системному рівні (рис. 3), оскільки середньоквадратичні значення для цього, як можна бачити, явно не підходять.

Як уже було сказано, традиційні методи теплового аналізу, що використовуються в даний час, не дають оптимальних результатів. У підсумку сучасні системи, як правило, з міркувань безпеки, мають завищені розміри, і за потужності заряджання в 350 кВт такий підхід не є прийнятним через значне збільшення ваги, місця, що займається, та загальної зручності використання.

Для подолання зазначених проблем та, відповідаючи на виклики сьогоднішнього дня, компанія TE Connectivity в рамках своєї діяльності в Асоціації німецьких виробників електротехніки та електроніки (*German Electrical and Electronic Manufacturers' Association, ZVEI*), активно розробляє новий підхід до проектування. Метою підходу є динамічне визначення підвищення температури та розсіювання тепла в системі, за допомогою нових встановлених принципів моделювання. Ця методологія дасть змогу заздалегідь проаналізувати кон-

струкцію компонента та спрогнозувати його продуктивність під час реальної експлуатації. Слід зазначити, що мета цієї роботи не в тому, щоб знизити запас міцності. Реалістичніше теплове моделювання забезпечить і оптимізацію витрат, і водночас безпечну та довгострокову експлуатацію системи заряджання та електромобіля загалом.

ЗНАЧЕННЯ ТЕПЛООВОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Як відомо зі шкільного курсу фізики, передача електричної енергії призводить до розсіювання потужності у вигляді теплових втрат у провіднику, по якому протікає струм. Основною причиною є електричний опір усіх провідників. Як правило, цей опір відомий для кожного елемента високовольного тракту. Однак, під час роботи опір провідника з підвищенням температури змінюється. Величина потужності, що розсіюється на елементі, може бути розрахована за певного значення струму, напруги та температури, тобто для стаціонарного стану, коли всі шляхи розсіювання тепла збалансовані.

Наявні методи динамічного розрахунку тракту високої напруги не дуже

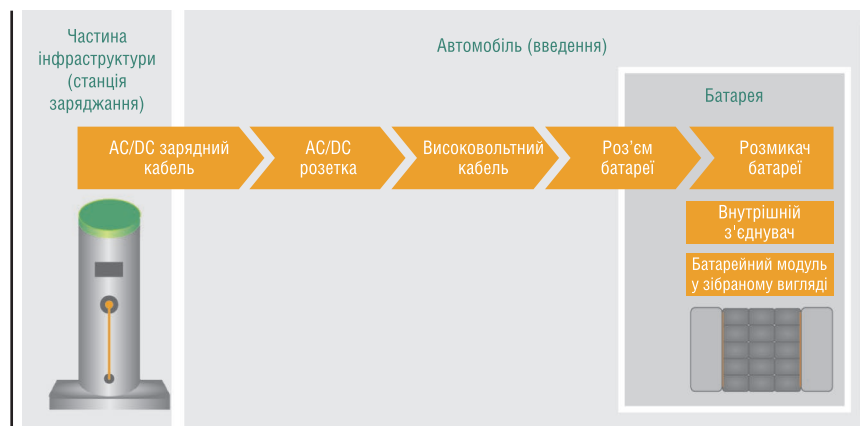


Рис. 3. Компоненти передачі струму в тракті заряджання електромобіля

практичні. Для застосування такого методу, як аналіз методом кінцевих елементів, необхідно було б швидко виконати безліч обчислень для кожної робочої точки. Метод скінченних елементів — це чисельний метод розв’язування диференціальних рівнянь із частинними похідними, а також інтегральних рівнянь, що виникають під час розв’язування задач прикладної фізики. Для безперервних теплових розрахунків у режимі реального часу (в самому транспортному засобі) потрібен інший підхід, що вимагає набагато менше обчислювальної потужності.

Одна з проблем полягає в тому, що розсіювання тепла у високовольтному тракті призводить до уповільнення системи заряджання. При цьому, залежно від маси окремого компонента і сусідніх елементів, що впливають на відведення тепла, кожен компонент буде по-різному реагувати на зміну профілів навантаження. Тому компоненти з обмеженими можливостями розсіювання тепла для керування температурою можуть перетворитися на проблему. Якщо тепло, що виділяється, не може бути розсіяно достатньою мірою, компонент тимчасово стане адіабатичним елементом (тобто перебуватиме у стані відсутності теплообміну з навколишнім середовищем) без будь-якої можливості зовнішнього впливу на процес його перегріву. Необхідно обчислювати такі теплові слабкі місця, щоб система не створювала на них непотрібних обмежень або напружень.

Крім того, розсіювання тепла відбувається кількома шляхами. На додаток до провідного тепловиділення всередині матеріалу, існує також розсіювання через охолоджувальне повітря або потоки охолоджувальної рідини (конвекція). Для кожного компонента в тракті поєднання цих трьох елементів буде різним.

Ще одна проблема полягає в тому, що, коли електричні компоненти нагріваються, це призводить до зміни їхніх електричних або механічних властивостей, і, як наслідок, зменшується їхній термін служби. Чим частіше і сильніше компонент перегрівається, тим швидше скорочується термін його служби. Тому необхідно знайти новий метод, який зможе забезпечити основу для проектування тракту високопотужного заряджання, що задовольнить і економічні критерії, і вимоги безпеки. Такий метод допоможе у виявленні потенційних слабких місць у тепловій системі, що може зменшити подальші зусилля з усунення неполадок.

МЕТОД СИСТЕМОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Метод системного моделювання обчислює теплові втрати вздовж високовольтного тракту за умов навантаження, що динамічно змінюються. Він заснований на законах Кірхгофа. «Правило вузлів» і «правило контуру» свідчать, що сума всіх струмів у вузлі та сума всіх напруг у контурі мають дорівнювати нулю.

Так само ми знаємо, що енергія завжди зберігається, з чого випливає, що тепла енергія, отримана в результаті електричного опору, точно дорівнює різниці між електричною енергією, що надходить у коло, та енергією, доступною в загальній системі. Еквівалентні схеми використовують безпосередній і лінійний взаємозв’язок між електричною і тепловою поведінкою (табл. 1).

Отже, для моделювання пов’язаних електричних і теплових характеристик можна використовувати еквівалентні принципіві схеми (рис. 4). Так само, як напруга спрямовує струм через резистор, різниця температур викликає перенесення тепла. Різні фізичні механізми перенесення тепла (провідність, конвекція, випромінювання) тут представлені резистором. Отримані алгебраїчні рівняння, представлені у вигляді компонентів, безперервно розраховують тепловиділення залежно від прикладеного струму та напруги, а також температури навколишнього середовища.

Таблиця 1. Взаємозв’язок між електричними та тепловими характеристиками

Електричні характеристики		Теплові характеристики	
I	Струм	P	Тепловий потік
U	Напруга	T	Температура
R	Опір	R _{th}	Тепловий опір
C	Ємність	C _{th}	Теплоємність

Грунтуючись на процесі тепловиділення, різні види відведення тепла представлені резисторами (тепловими опорами). Використовуючи цей доволі простий метод, можна моделювати окремі компоненти, цілі вироби (наприклад, роз’єм, як на рис. 5) або високовольтний тракт загалом.

Щойно моделі кабелів надійдуть від виробників, з’явиться можливість розрахувати всі проміжні секції. Також можливо інтегрувати компоненти від різних виробників, для цього потрібно лише ввести електричні параметри виробу. У рамках моделі ці параметри застосовуються до алгебраїчних рівнянь, які слідує законам Кірхгофа.

Моделювання здатне визначити:

- розташування джерел тепла і тепловідводів;
- коли рівень температури стає критичним і коли він починає завдавати шкоди компоненту;
- як компонент інтегрується у більший кластер;
- де знаходяться адіабатичні стани і який вплив вони матимуть.

За допомогою отриманої методології можна тестувати профілі динамічного

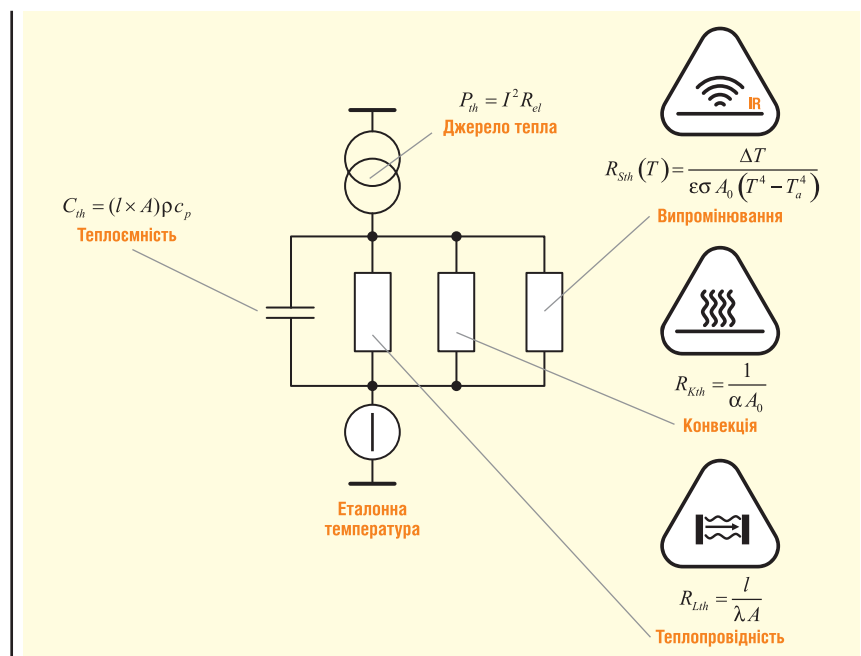


Рис. 4. Приклад еквівалентної схеми

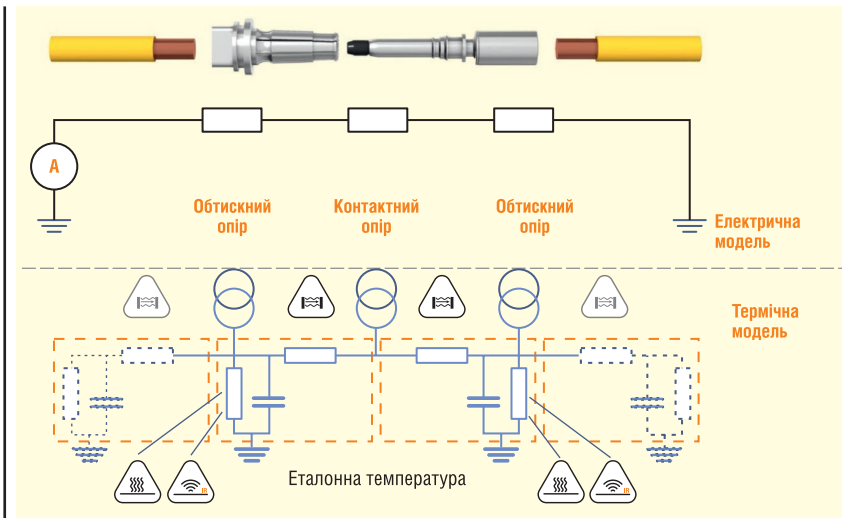


Рис. 5. Приклад моделювання роз'єму

навантаження для кожного компонента у високовольтному тракті з використанням мінімальних обчислювальних потужностей.

того, симуляція може охоплювати широкий діапазон тестування, який ніколи не буде досягнутий у лабораторних умовах.

ПОСИЛЕННЯ БЕЗПЕКИ

Обчислювальна потужність, необхідна для такого теплового моделювання, настільки мала, що цю процедуру можна виконувати безперервно на типовому автомобільному блоці керування, як буденне завдання. Це означає, що фактичні профілі навантаження можуть бути розраховані в режимі реального часу під час процесу водіння. Теплові розрахунки в поєднанні з даними датчиків взаємно доповнюють один одного, що може посилити безпеку автоматизованих транспортних засобів, які потребують багаторазового резервування.

ПРОЄКТУВАННЯ ВИСОКОВОЛЬТНИХ КОМПОНЕНТІВ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ

Системне теплове моделювання значно наближає конструкцію високовольтних компонентів транспортного засобу до реальних умов експлуатації. Виробникам важливо мати можливість прогнозувати поведінку компонента при впливі теплових факторів. Системне і динамічне теплове моделювання точно прогнозує зміни в роботі компонента в результаті процесів зношення і старіння. Стане можливо змоделювати та передбачити поведінку такої складної системи як високовольтний тракт. Крім

ВИСНОВОК

Для того, щоб безпечно використовувати потужність заряджання 350 кВт і виявити потенційні теплові слабкі місця, необхідно змоделювати повні профілі динамічного навантаження з високою напругою. Системне теплове моделювання високовольтних компонентів, засноване на еквівалентних схемах, надає дані для створення конструкції, яка зможе нагріватися до граничної температури без шкоди для необхідної довговічності та надійності всієї системи. Ці знання допоможуть у розробленні оптимізованої конструкції тракту високої напруги й, таким чином, підвищать рівень безпеки, оскільки теплове навантаження, що моделюється, наближене до реальних умов експлуатації, а простота обчислень дасть змогу моделювати поведінку компонентів прямо в бортовій мережі електромобіля. Кінцева мета полягає в тому, щоб спроектувати компоненти тракту без збільшення розмірів і таким чином, щоб вони могли безпечно витримувати короточасне динамічне навантаження високопотужного заряджання (10 хвилин) упродовж усього терміну служби. Моделювання виявляє гарячі точки (здебільшого це пасивні компоненти з малою масою), які можна змінити й оптимізувати на ранніх стадіях розроблення. Описаний метод у вигляді системного теплового моделювання високовольтних компонентів дасть змогу зробити істотний внесок у процеси перевірки якості.

CN

РАДІОМАГ

МЕРЕЖА МАГАЗИНІВ РАДІОДЕТАЛЕЙ

www.radiomag.com.ua