

Оригінал: <https://www.electronicdesign.com/automotive/thermal-modeling-how-meet-ev-high-power-charging-requirements>



[РИНКИ > АВТОМОБІЛІ](#)

## Теплове моделювання: як відповідати вимогам до високопотужного заряджання електромобілів

Електрифікація силової передачі, автоматизація та нові бізнес-моделі формують мобільність наступного покоління. Ці тенденції глибоко вплинуть на електричну потужність та електронні архітектури майбутніх транспортних засобів.

[Марко Вулф](#) | 02 липня 2019 року

[\*Завантажте цю статтю у форматі PDF \(англ.\).\*](#)

Наступне покоління транспортних засобів буде генерувати, обробляти та передавати набагато більше даних, ніж сучасні транспортні засоби. Бездротова мережа за допомогою мобільних технологій (наприклад, 5G, V2X) дозволяє спілкуватися з іншими транспортними засобами або з навколишньою інфраструктурою, а також робить можливим оновлення програмного забезпечення «через повітря» (*over-the-air* – OTA) – за протоколами бездротового зв'язку.

У той же час висока електрична потужність буде передаватися всередині електрифікованих автомобілів. Сьогодні електромобілі вже мають надлишок у 120 кВт потужності двигуна. Високі значення потужності, необхідні для відповідної продуктивності, створюють сильні електромагнітні поля, які потребують захисту сусідніх сигнальних ліній та електронних компонентів від перешкод та несправності (висока швидкість передачі даних до 20 Гбіт за високої потужності).

Простіше кажучи, фізичний рівень чинників матиме вирішальну роль як основа майбутньої функційності автомобіля та забезпечення його надійності. Це означає, що мережі передачі даних низької напруги та системи управління високої напруги (HV) повинні працювати паралельно максимально надійно та безпечно.

### **Структура електромобільності**

Електрифікація силової передачі служить для зменшення споживання транспортними засобами викопного палива, незважаючи на збільшення світового попиту на мобільність. Це єдиний спосіб задовольнити все більш жорсткі обмеження на викиди парникових газів (CO<sub>2</sub>) у середньо- та довгостроковій перспективі.

Велика довжина пробігу в електромобілів (EV) буде забезпечена швидким заряджанням від постійного струму та майбутньою потужністю зарядки у 350 кВт, яку класифікують як заряджання постійним струмом високої потужності (*high-power dc charging* – HPC DC).

### **Важливість заряджання струмом високої потужності (HPC)**

Донедавна більшу увагу приділяли рушійній стороні електромобільності замість питань заряджання. Це можна пояснити відсутністю зрілості в бізнес-моделях двох залучених галузей – виробників автомобілів (виробників оригінального обладнання, *original equipment makers* – OEMs) та виробників енергії.

Типове використання EV відрізняється залежно від країни. У той час як європейські водії EV очікують, що їх автомобіль буде спроможним періодично їздити на далекі відстані, азіатські водії EV зазвичай прагнуть використовувати свої машини на коротких відстанях у мегаполісах. HPC DC дозволить використовувати електромережі в усіх випадках. Однак простого розширення мережі зарядних станцій змінного струму в місті буде недостатньо, оскільки заряджання струмом більш низької потужності призведе до неприпустимо довгих термінів очікування та черг.

Збільшення ємності акумуляторних батарей (АБ) для подовження дальності пробігу можна використовувати корисним способом лише в тому

випадку, коли «більші» АБ не призводять до збільшеного часу заряджання. Із зарядною потужністю 350 кВт можна було б отримати до 300 км додаткового запасу ходу за декілька додаткових хвилин максимум. Це перетворило б «зупинки для заряджання» EV у прийнятно короткі перерви (які можна порівняти із заправленням автомобілів з двигуном внутрішнього згорання), а станція заряджання постійним струмом швидко ставала б доступною для наступного транспортного засобу. Однак потужність зарядки у 350 кВт за струмів до 500 А є піковою навантагою для повного ланцюга проходження струму від зарядної станції до АБ автомобіля.

Високий струм, що протікає таким ланцюгом, спричиняє великі втрати теплоти, оскільки електричний опір усіх компонентів (розніми, кабель) неминуче генерує тепло. Цю втрату теплоти необхідно враховувати в конструкції та розмірі всіх електропровідних компонентів, щоб уникнути перевантаження або перегрівання, або контрольованого зменшення струму зарядки, якщо АБ почне перегріватися під час заряджання. Незважаючи на те, що зменшення струму захищає АБ, воно також продовжує і час зарядки. Таку розбіжність цілей слід вирішувати оптимально.

Це може забезпечити терморегулювання передбачанням точного стану всіх компонентів у кожному сегменті структури в кожний момент часу.

### **Проблема НРС**

НРС DC являє собою стан пікової навантаги для електричної системи в EV. Струм заряджання високої потужності НРС DC викликає значне підвищення температури у всіх компонентах. Процес ще більше посилюється, коли транспортний засіб не рухається, оскільки для охолодження бракує процесів конвекції. Тому для полегшення НРС DC всю електричну систему від пункту заряджання до АБ автомобіля потрібно спроектувати та розрахувати з урахуванням її електричного та теплового режимів.

Основним чинником такої проблеми є те, що більший струм потребує більшого перерізу кабелю для перенесення потужності на тому ж рівні напруги без перегріву. Всередині транспортного засобу це, насамперед, питання маси та наявного простору. Наприклад, вартість, маса та об'ємність суттєво різнитимуться відповідно до того, чи буде достатньо 50 мм<sup>2</sup> або 95 мм<sup>2</sup> перерізу провідника між входом та батареєю.

Привабливим варіантом є підвищення напруги, щоб однакову кількість потужності можна було передавати з нижчим рівнем струму. Хоча зміна розмірів електричних компонентів потенційно спричиняє небажану додаткову масу транспортного засобу, вона також наближається до меж маси у випадку фіксованих зарядних кабелів (режим 4 кабелів). Якщо НРС DC має

бути реалістичною пропозицією, слід уникати надмірних розмірів кабелю та всіх інших електричних компонентів.

### Сьогоднішнє проєктування електричних компонентів

Наразі проєктування електричних компонентів разом із ланцюгом струму високої потужності засноване на припущеннях, які не пристосовані ні для динамічних профілів навантаги під час водіння, ні для вимог НРС DC. Існуючі стандарти базуються на статичних точках навантаги, спочатку використовуваних для проєктування реле (комутаторів) та запобіжників, яку визначають статистичними методами, що відображають частоту, з якою вона виникає, та її значення. Це призводить до того, що середні квадратичні значення СКЗ (*root-mean-square* – RMS) показують статичні умови (рис. 1).

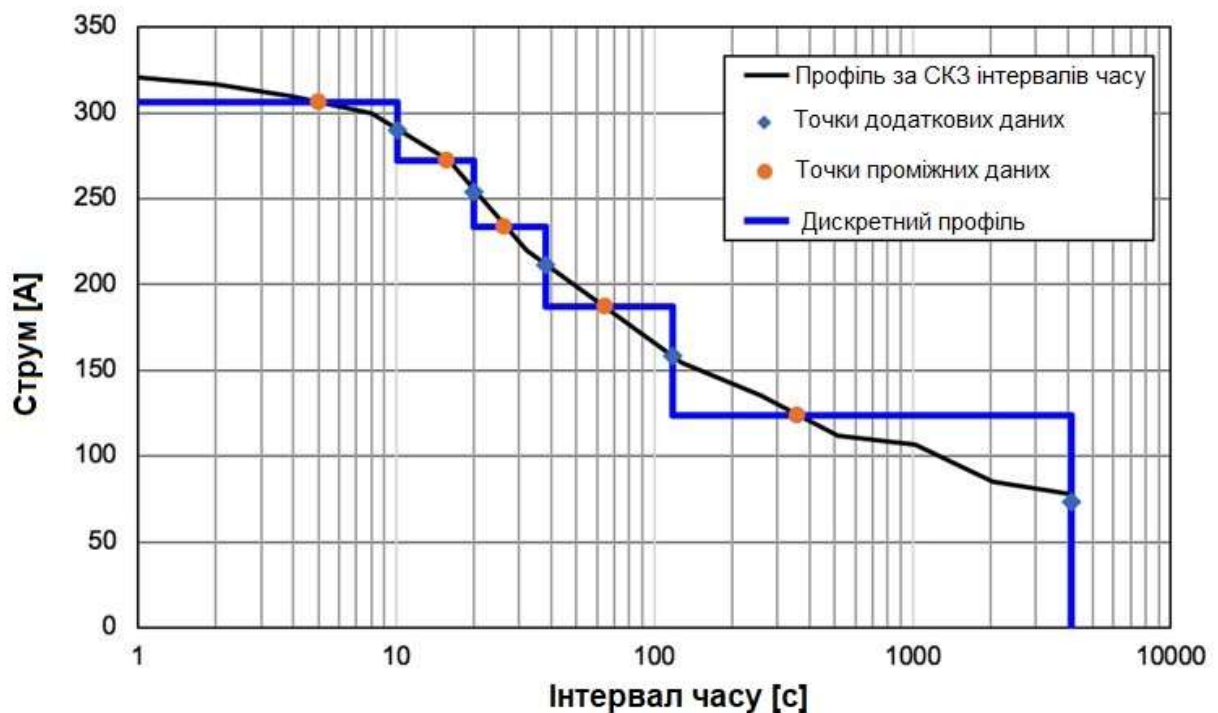


Рисунок 1. Це метод кількісного визначення профіля для пропускання струму, наведеного на рис. 2.

Компоненти електричних з'єднань розробляють відповідно до вищенаведеного типу профілю навантаги – який не відображає реальності – із доданим запасом надійності в 20%. Фактичний профіль навантаги в EV, однак, істотно відрізняється від попередньо застосовуваних у транспортних засобах та від їх середніх квадратичних значень (СКЗ) (рис. 2).

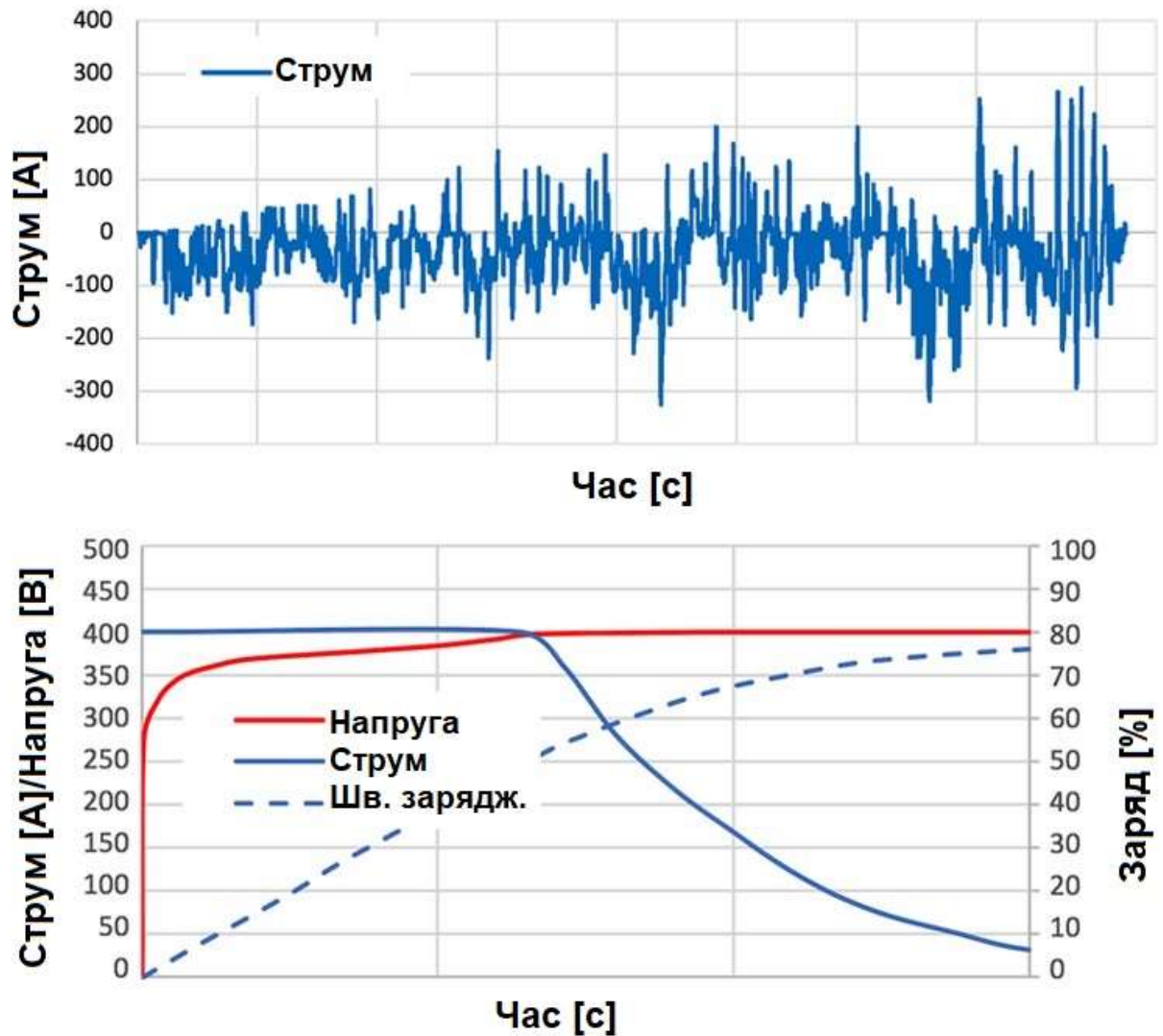


Рисунок 2. Профіль струму під час руху порівняно з профілем чинників навантаги під час НРС

На рисунку 2 показано, чому тепловий розрахунок настільки важливий для заряджання. Незважаючи на те, що рух призводить до дуже динамічної зміни профілю струму, що складається із змін навантаги між високими піками і мінімумами, постійна велика навантага під час НРС взагалі не відображається в профілі навантаги, отриманому під час руху. Для зниження пікової навантаги від заряджання потужністю 350 кВт необхідний інший підхід до проектування електричних компонентів.

Хоча електрична енергія, що зберігається в АБ, зазвичай витрачається протягом декількох годин під час руху, кількість енергії, більша у три-чотири рази, надходить до АБ у разі НРС DC протягом декількох хвилин. Відповідно, повний ланцюг високої напруги / високого струму слід проаналізувати на системному рівні, щоб зрозуміти його поведінку під час

заряджання (рис. 3). Кореневе середньоквадратичне не дуже корисне для цього, як було детально описано раніше.



Рисунок 3. Показані по-різному напружені компоненти вздовж ланцюга струму електромобіля (EV).

Важливо знати, де постійна навантага може спричинити перегрів, який здатний призвести до критичного стану системи. Цей аспект для тепловідведення необхідно проаналізувати більш ретельно. Наразі використовувані методи не дають потрібних відповідей.

Як наслідок, системи струму є статично завищеними через міркування безпеки. Із потужністю заряджання у 350 кВт цей підхід не є стійким через вплив на масу, простір для установки та зручність використання.

Щоб вирішити цю проблему, [TE Connectivity](#) розробляє новий підхід до розрахунків у рамках співробітництва з ZVEI (Німецька асоціація виробників електричних та електронних виробників). Метою підходу є динамічне визначення підвищення температури, спричиненого компонентами, а також відведення теплоти в системі за допомогою загальних принципів моделювання (як такі, що застосовують, наприклад, для електричних систем). Така методологія дозволяє дослідити конструкцію компонентів раніше, щоб передбачити її ефективність під час експлуатації.

Дослідження теплових умов на аналогових моделях забезпечує підтверджену основу для майбутніх профілів навантаги, які полегшують доведення безпечності, надійності та доступності всіх компонентів взаємозв'язку ланцюга високої напруги / високого струму.

### Важливість дослідження теплових умов

Фізичні процеси передавання електричної енергії спричиняють розсіювання енергії у вигляді втрат теплоти вздовж провідника, яким

рухається потік енергії. Першопричиною є електричний опір (вимірюється в омах) всіх металевих провідників.

Такий опір має кожний елемент ланцюга високої напруги. Однак омічний опір змінюється зі збільшенням температури під час роботи. Обсяг розсіювання потужності, що виникає на окремому складнику, може бути обчислений для певних величин струму, напруги та температури – хоча й лише для стаціонарного стану, коли всі ланцюги відводу теплоти стабілізовані.

Існуючі методи динамічного розрахунку усіх елементів ланцюга високої напруги на системному рівні не дуже практичні. Щоб застосувати такий відомий метод, як аналіз методом скінченних елементів (*finite element analysis* – FEA), необхідно було б для кожної робочої точки робити одне за одним багато обчислень. Зрозуміло, що постійний тепловий розрахунок у режимі реального часу (в транспортному засобі) вимагає іншої методології, яка потребує значно менших обчислювальних потужностей.

Однією з проблем є те, що відведення теплоти у ланцюгу високої напруги створює порівняно повільну систему. Залежно від маси окремого компонента та наявних сусідніх тепловідводів, окремий компонент буде по-різному реагувати на зміну профілів навантаги.

Легкі компоненти, що мають обмежену можливість відводити теплоту, можуть стати вузьким місцем у терморегулюванні. Якщо продукована теплота не буде в міру розсіяна, компонент тимчасово перетвориться на адіабатний елемент (тобто набуде стану без теплообміну з навколишнім середовищем) без жодної можливості зовнішнього впливу на процес свого нагріву. Необхідно досліджувати термічно вузькі місця цього типу, щоб не створювати в системі зайві обмеження чи напруження.

Більше того, тепловідведення відбувається кількома напрямками. Окрім тепловідведення завдяки матеріалу провідника, теплове випромінювання та тепловідведення відбуваються за допомогою повітряного потоку або потоків теплоносія (конвекції). Для кожного компонента вздовж ланцюга високої напруги змішування цих трьох складових тепловідведення буде різним.

Коли електричні компоненти нагріваються, в них також відбуваються процеси старіння, які з часом змінюють електричні (та/або механічні) властивості компонента. Що значиміше виділення теплоти, то швидші процеси старіння і менший залишковий ресурс продуктивності компонента.

### **Проблема НРС**

Тому необхідно знайти інший інструмент, який дозволяє вчасно визначити безпечну та економічно обґрунтовану конструкцію ланцюга струму для НРС DC - та підтвердити її безпечність. Використання надійного

моделювання теплових систем дозволяє заздалегідь автоматично перевірити практично необмежену кількість можливих профілів навантаги. Це виявить потенційно вузькі місця в системі, які можна усунути зміною конструкції.

Використання такої методології може зменшити подальші зусилля щодо усунення несправностей. Через те, що тепла система така складна, моделюванням можна досягти значного зменшення зусиль, витрачених на виявлення причин. Точна першопричина несправності може бути не в тому компоненті, що діагностують першим, а в сусідньому у тепловому ланцюгу.

### **Метод моделювання системи**

Вдосконалена методика моделювання системи, за якою обчислюють втрати теплоти у ланцюгу високої напруги за динамічно мінливих умов навантажування, заснована на законах електричних кіл Кірхгофа. Його "правило точок" і "правило контуру" зазначають, що сума всіх струмів у будь-якій "точці" розгалуження провідників і сума всіх напруг у будь-якому "контурі" електричного кола повинні бути нульовими.

У той же час, в правилі зазначено, що енергія завжди зберігається<sup>1</sup>. Це означає, що струм, який перетворюється в теплоту (втрати теплоти) через електричний опір, не втрачається. Отримана тепла енергія рівна різниці між електричною енергією, що надходить в електричне коло, та енергією, наявною в цільовій системі. В еквівалентних схемах використовують безпосередній лінійний зв'язок між електричними та тепловими процесами (рис. 4) .

---

<sup>1</sup> Друге правило Кірхгофа: алгебраїчна сума добутків опору кожного з ділянок будь-якого замкнутого контуру розгалуженого ланцюга постійного струму на силу струму на цій ділянці дорівнює алгебраїчній сумі електрорушійних сил уздовж цього контуру, прим. перекладача



Електрична	Термічна
Струм <b>I</b>	<b>P</b> Потік тепла
Напруга <b>U</b>	<b>T</b> Температура
Опір <b>R</b>	<b>R<sub>th</sub></b> Теплоопір
Ємність <b>C</b>	<b>C<sub>th</sub></b> Теплоємність

Рисунок 4. Кореляція між електричними та тепловими процесами є основою для моделювання еквівалентних схем\*.

Отже, еквівалентні схеми (рис. 5) служать для моделювання пов'язаних електричних та теплових процесів. Так само, як напруга викликає рух струму через резистор, різниця температур спричиняє перенесення теплоти. Кожна з різних фізичних форм перенесення (теплопровідність, конвекція, випромінювання) презентована на схемі резистором. Збережені алгебраїчні рівняння в моделі компонента постійно обчислюють генерацію теплоти залежно від прикладеного струму та напруги, а також температури навколишнього середовища.

\* Аналогове моделювання ґрунтується на схожості за деякими ознаками («аналогії») процесів і явищ, які мають різну фізичну природу, але які можна описати однаковими математичними моделями. Докладніше див., наприклад: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Аналогове\\_моделювання](https://uk.wikipedia.org/wiki/Аналогове_моделювання) - прим. перекладача

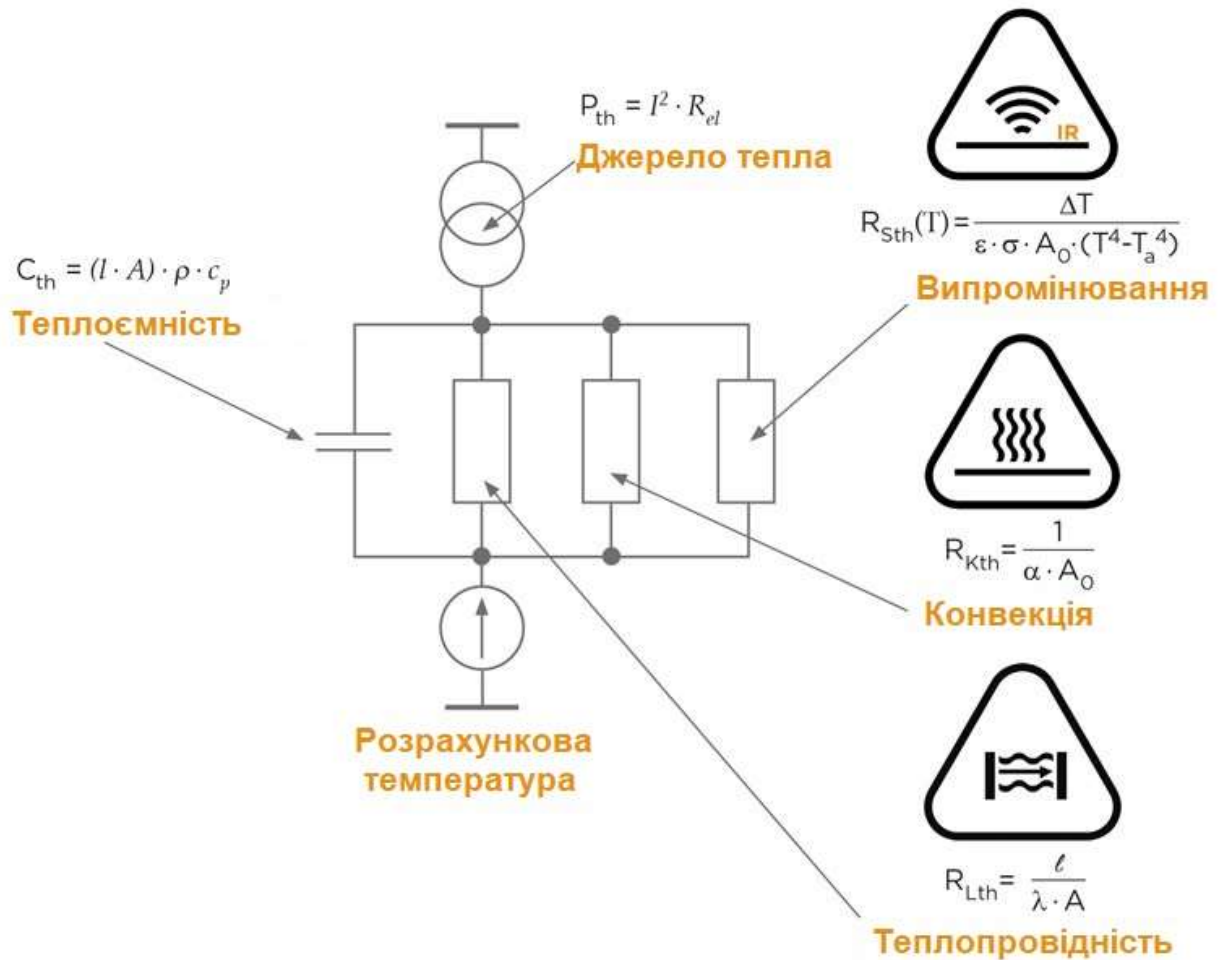


Рисунок 5. На цій еквівалентній схемі теплового моделювання резистори репрезентують три способи відведення теплоти.

На основі наведеної генерації теплоти різні можливості тепловідведення в еквівалентній схемі репрезентовані резисторами (теповими бар'єрами) і тепловими масами/ємностями. На діаграмі представлено відведення теплоти у простір через теплопровідність матеріалу, випромінювання та конвекцію.

Використовуючи цей досить простий метод, можна змоделювати окремі компоненти (наприклад, контакт), цілі вироби (наприклад, рознім, як на *рис. б*), або високовольтний ланцюг, оскільки генерацію теплоти та тепловідведення можливо передбачити утворенням відповідного контуру резисторів.

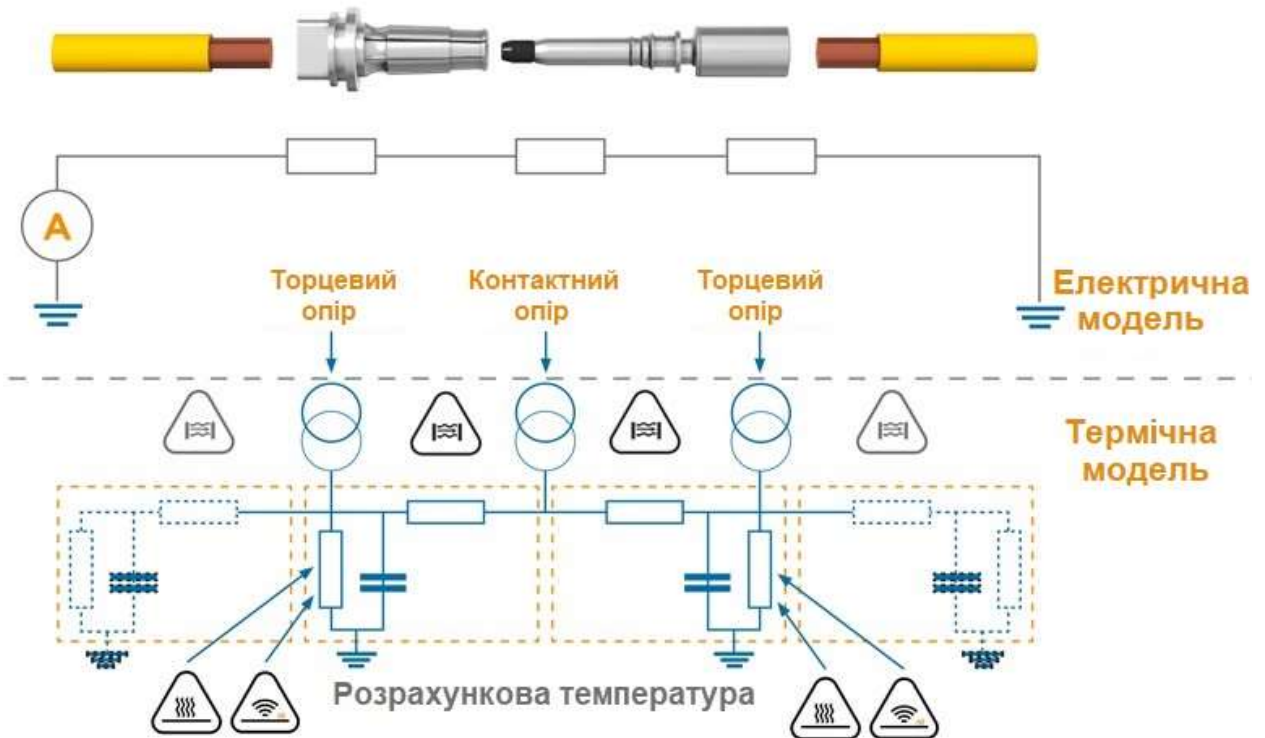


Рисунок 6. Рознім розбивають на контури: електричні точки контакту в рознімі відповідають тепловому моделюванню.

Якщо моделі кабелів від виробників кабелів доступні, проміжні розділи також можна розрахувати. Крім того, можна інтегрувати компоненти різних виробників (відповідно до бортової мережі) – все, що потрібно, це ввести електричні параметри відповідно до даних виробника. У моделі ці параметри застосовують в алгебраїчних рівняннях, які відповідають законам Кірхгофа. По суті, модель описує вироблення теплоти й теплообмін з навколишнім середовищем.

Моделювання може визначати, наприклад, розташування джерел теплоти та тепловідводи; коли рівень температури стає критичним і починає скорочувати термін служби компонента; як компонент інтегровано в більший кластер; де можна виявити адіабатні стани та який їх вплив.

Під час розробки оригінальної моделі результати взаємодії між даними моделювання та випробування (необробленими даними лабораторного випробування) слугували для вдосконалення алгебраїчної частини моделі, поки точність прогнозування не почала відповідати результатам випробувань.

За отриманою методологією моделювання динамічні профілі навантаги можуть бути випробувані для кожного компонента у ланцюгу високої напруги з мінімумом обчислювальної потужності.

### **Підвищення безпеки**

Обчислювальна потужність, необхідна для теплового моделювання на основі еквівалентних схем, є настільки низькою, що цю процедуру можливо виконувати як постійне рутинне завдання на типовому автомобільному електронному блоці управління (*electronic control unit* – ECU). Таким чином, можна обчислювати фактичні профілі навантаги під час руху в режимі реального часу.

Моделювання надає дані, що сприяють підвищенню функційної безпеки. Дані моделювання та датчиків взаємно доповнюють одні одних як різні діагностичні процедури. Для автоматизованих транспортних засобів, які потребують багаторазового резервування з міркувань безпеки, це може сприяти досягненню концепції безпеки.

### **Проектування компонентів HV для транспортного засобу**

Моделювання теплових систем сприяє наближенню до реальних робочих умов орієнтованої на навантагу конструкції компонентів високої напруги транспортного засобу. Як відомо виробникам, дуже важливо мати можливість передбачити продуктивність компонента на стадії його розробки. Динамічне теплове моделювання системи точно виявляє ефекти, очікувані від зносу та старіння під час роботи. І це, таким чином, дає можливість змодельовати та передбачити поведінку такої складної системи, як ланцюг високої напруги. Крім того, моделювання може охопити такий широкий спектр випробувань, який ніколи не був би досяжним у випробувальній лабораторії.

Для отримання додаткової інформації відвідайте <https://www.te.com/high-power-charging>.

Марко Вулф - головний інженер з польових програм в [TE Connectivity](#).



## ЗМІСТ

Структура електромобільності .....	2
Важливість заряджання струмом високої потужності (НРС).....	2
Проблема НРС .....	3
Сьогоднішнє проєктування електричних компонентів.....	4
Важливість дослідження теплових умов .....	6
Проблема НРС .....	7
Метод моделювання системи.....	8
Підвищення безпечності.....	12
Проєктування компонентів HV для транспортного засобу .....	12
ЗМІСТ .....	13
ПЕРЕЛІК ІЛЮСТРАЦІЙ.....	13
АБРЕВІАТУРИ.....	14

## ПЕРЕЛІК ІЛЮСТРАЦІЙ

Рисунок 1. Це метод кількісного визначення профіля для пропускання струму, наведеного на рис. 2.....	4
Рисунок 2. Профіль водіння порівняно з профілем чинників навантаги під час НРС .....	5
Рисунок 3. Показані по-різному напружені компоненти вздовж ланцюга струму електромобіля (EV).....	6
Рисунок 4. Кореляція між електричними та тепловими процесами є основою для моделювання еквівалентних схем. ....	9
Рисунок 5. На цій еквівалентній схемі теплового моделювання резистори репрезентують три способи відведення теплоти. ....	10
Рисунок 6. Рознім розбивають на контури: електричні точки контакту в рознімі відповідають тепловому моделюванню. ....	11



## АБРЕВІАТУРИ

EV (electric vehicle)	Електромобіль
5G (fifth generation)	П'яте покоління бездротових систем
CO <sub>2</sub>	Діоксид вуглецю, вуглекислий газ
DC (direct current)	Постійний струм
ECU ( <i>electronic control unit</i> )	Електронний блок управління
FEA ( <i>finite element analysis</i> )	Аналіз методом скінченних елементів
HPC ( <i>high-power charging</i> )	Заряджання високої потужності
HPC DC ( <i>high-power dc charging</i> )	Заряджання постійним струмом високої напруги і потужності
HV ( <i>high voltage</i> )	Висока напруга
OEMs ( <i>original equipment makers</i> )	Виробники оригінального обладнання
OTA ( <i>over-the-air</i> )	«Через повітря» - через протоколи бездротового зв'язку (наприклад, оновлення програмного забезпечення)
RMS ( <i>root-mean-square</i> )	Середньоквадратичне значення (СКЗ)
V2X ( <i>vehicle-to-everything</i> )	Передавання даних від транспортного засобу на будь-який пристрій та навпаки
ZVEI	Німецька асоціація виробників електричних та електронних виробників
Гбіт	Гігабіт, одиниця інформації
кВт	Кіловат, одиниця потужності