

Модернізація силових модулів для підвищення густини потужності та терміну служби

Штефан Бушхорн (Stefan Buschhorn), Infineon Technologies
Клаус Фогель (Klaus Vogel), Infineon Technologies

Покращення теплових характеристик може бути досягнуто завдяки використанню «хвильової» концепції підключення базової плати силового модуля, навіть якщо всі інші елементи залишаються незмінними.

Електрифікація приводів великовантажних автомобілів створює безліч викликів для виробників силових напівпровідникових приладів. Однією з найскладніших вимог є підвищення стійкості до циклічних навантажень: цей показник багато в чому визначає термін служби силових модулів. «Хвильова» базова плата вдосконаленого корпусу EconoDUAL3 вже добре себе зарекомендувала: така структура заднього боку силового модуля значно покращує теплові характеристики системи охолодження з відкритим рідинним радіатором без зміни інших елементів конструкції модуля. Залежно від радіатора такий підхід дає змогу збільшити вихідний струм більш ніж на 20% або, відповідно, значно підвищити термін служби за заданого профілю навантаження.

ПОРІВНЯННЯ КОНЦЕПЦІЙ РАДІАТОРІВ

Для пасажирських електромобілів і електробусів рідинні радіатори вважаються стандартним рішенням, при цьому існують дві різні конструктивні концепції, показані на рисунку 1. Перший варіант — охолоджувальна плита закритої системи охолодження, в якій силовий модуль з термопастою встановлюється зверху на теплостік.

Чітко визначений тепловий інтерфейс «модуль-радіатор» дає змогу окремо легко оптимізувати температуру обох частин, а також використовувати стандартні компоненти системи охолодження. Однак підвищити ефективність відведення тепла можна за допомогою концепції «відкритої» системи, за якої задній бік силового модуля перебуває в безпосередньому контакті з рідиною. В останньому випадку теплові характеристики визначаються як комбінація параметрів тепловідведення і силового модуля, оскільки залежать від властивостей інтерфейсу між базовою платою і радіатором.

На рисунку 1б представлено модуль із «хвильовою» базовою платою. За такої концепції задній бік модуля розміщується у «відкритому» радіаторі. Хвильова структура збільшує площу поверхні та водночас підвищує турбулентність у рідині. Обидва ефекти знижують тепловий опір, що забезпечує зменшення температури напівпровідникових чипів порівняно зі звичайним конструктивом із плоскою базою. На противагу цьому стандартний силовий модуль із нанесеним інтерфейсним шаром термопасту встановлюється на монтажну площину закритого радіатора. До того ж площа поверхні, що охолоджується рідиною, та турбулентність визначаються тільки властивостями радіатора.

ЕФЕКТИВНІСТЬ ОХОЛОДЖЕННЯ В РІЗНИХ УМОВАХ

Порівняння продуктивності виконано для напівмостового модуля з номінальним струмом 900 А в корпусі EconoDUAL3. Для коректності порівняння обидва варіанти системи тестуються за різних струмів Irms і частоти перемикання 4 кГц. Вимірювання температури чипів виконано за допомогою тепловізора на спеціально підготовлених відкритих модулях, пофарбованих у чорний колір.

На рисунку 2 показано тепловий профіль відкритого модуля для двох різних концепцій охолодження за однакових умов експлуатації. Стандартний силовий ключ із плоскою базовою платою встановлено на закритому радіаторі, такий самий елемент із «хвильовою» базою працює на відкритому теплостіці. Перевага другого варіанта, що забезпечує явне зниження температури, очевидна.

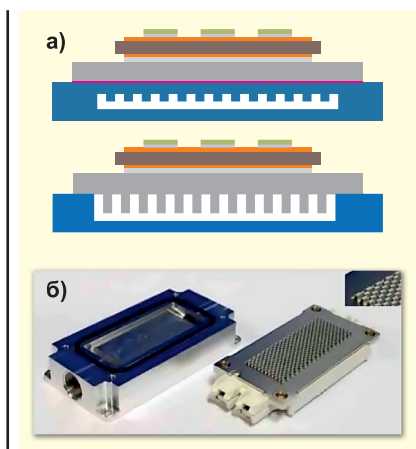


Рис. 1. Дві концепції радіаторів: силовий модуль на закритому (зверху) і відкритому (знизу) рідинному радіаторі (а); вильова технологія — базова плата силового модуля встановлена на відкритий радіатор (б)

Середня температура чипів $T_{j,av}$ визначена за тепловим профілем, використовується для подальшого аналізу. На рисунку 3 наведено значення $T_{j,av}$ для різних концепцій охолодження залежно від вихідного струму. Температура води на вході (+50 °C) показана горизонтальною лінією для індикації максимальних пульсацій T_j у кожному робочому режимі. І знову варіант із відкритим тепловідведенням і «хвильовою» базою забезпечує набагато менше нагрівання, яке додатково зменшується зі збільшенням об'ємної витрати рідини. За швидкості потоку 15 л/хв і $I_{rms} = 500$ А досягається зниження температури на 25 К. Своєю чергою, скорочуватимуться і пульсації T_j для заданого профілю навантаження.

Отримані результати дуже привабливі для великовантажних автомобілів, де максимальна робоча температура має бути обмежена, щоб уникнути великих градієнтів T_j , що призводять до зниження терміну служби. Як альтернатива рішення з «хвильовою» базою дозволяє збільшити вихідний струм до 30%, що також збільшує густину потужності.

Під час розгляду графіків може здатися, що підвищення швидкості потоку є хорошим рішенням, однак це досягається завдяки збільшенню перепаду тиску на тепловідводі. Зрештою необхідний ретельний аналіз системи охолодження, що дає змогу знайти оптимальний баланс між швидкістю потоку, перепадом тиску і тепловими характеристиками системи.

ПОКРАЩЕННЯ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ

Ще один дуже важливий показник для транспортних застосувань — термін служби силових модулів. Насамперед це стосується міського транспорту, для якого характерна велика кількість стартів і зупинок, що вимагає від приводу високої надійності під час впливу циклічних імпульсів потужності (*Power Cycling, PC*). Характеристики стійкості силових модулів до термоцикування надаються виробником, проте слід оцінити використаний метод перевірки, оскільки він може істотно вплинути на результати випробувань.

Оскільки концепція «хвильової» бази вимагає доопрацювання тільки нижньої сторони модуля, загальна стійкість до РС у цьому разі така сама, як і у стандартних компонентів. З урахуванням цього покращення теплових характеристики, як описано вище, призводить до зменшення пульсацій температури і, отже, до збільшення терміну служби для заданого профілю навантаження.

Перше уявлення про переваги нової концепції можна отримати, зробивши просте порівняння: максимальний градієнт температури визначається температурою води на вході системи та нагріванням чипа за заданого струму I_{rms} . Якщо припустити, що це єдина пульсація температури на одному циклі навантаження, то можлива кількість циклів безпосередньо визначається кривою РС.

На рисунку 4 показано підсумковий відносний термін служби модулів для різних концепцій охолодження. Виходячи з цих даних за вихідного струму 500 А термін служби може бути підвищено у 2–5 разів. Водночас вихідний струм може бути збільшений від 20% більш ніж до 30%, залежно від швидкості потоку для одного і того ж конструктиву без шкоди для надійності. Це дуже перспективні оцінки, особливо з урахуванням того, що сам силовий модуль, його електрична схема і плата драйвера взагалі не змінюються. Єдина

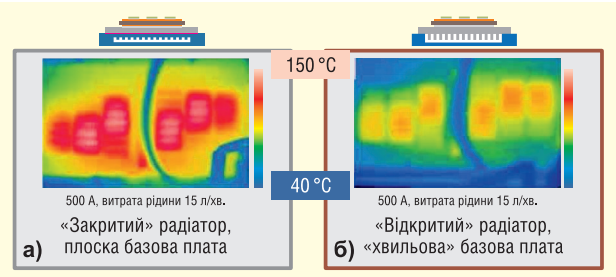


Рис. 2. Вимірювання температури закритого радіатора з плоскою базовою платою (а) і відкритого радіатора з хвильовою базовою платою (б). В обох випадках струм $I_{rms} = 500$ А, витрата рідини — 15 л/хв

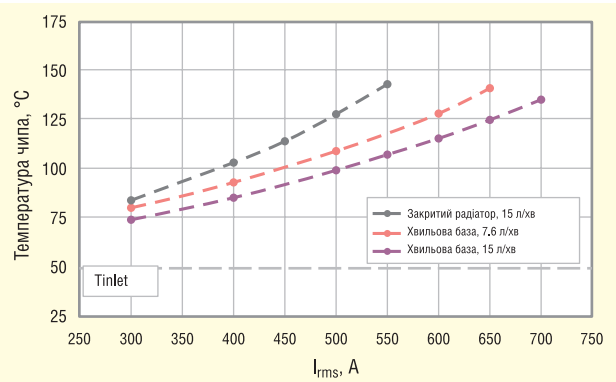


Рис. 3. Температура чипа (вимірювання за допомогою тепловізора) закритого радіатора за швидкості потоку 15 л/хв і відкритого радіатора, з'єднаного з «хвильовою» базою модуля, за двох різних швидкостей потоку

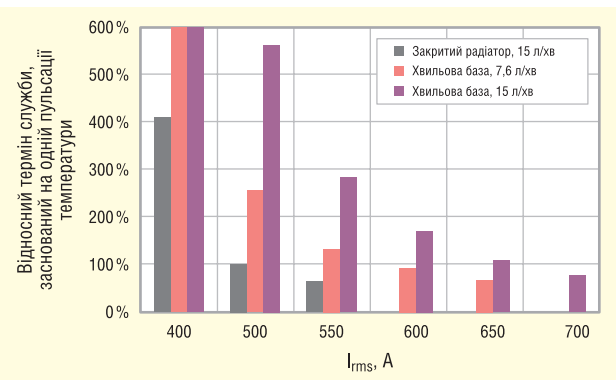


Рис. 4. Відносний термін служби, передбачається тільки одна пульсація температури при заданому струмі I_{rms}

відмінність полягає в переході від плоскої базової плати до «хвильової» з відкритим тепловідведенням.

Підбиваючи підсумок, можна вважати доведеним, що «хвильова» технологія забезпечує явну перевагу для конкретного застосування. Завдяки «хвильовій» конструкції заднього боку силового модуля досягається помітне поліпшення теплових характеристик, водночас усі інші елементи конструкції залишаються незмінними. Це може бути використано для збільшення вихідного струму більш ніж на 20% або для значного підвищення ресурсу модуля за заданих умов експлуатації. Останнє особливо привабливо для застосувань із високим циклічним навантаженням, як-от електробуси або електричні розвізні вантажівки, де режим «старт-стоп» висуває високі вимоги до надійності силового модуля.