

Інтегрований силовий модуль забезпечує тепер на 25 % більше потужності

Бернхард Айхлер (Bernhard Eichler), директор з управління виробництвом систем та потужних модулів, Semikron Danfoss Elektronik GmbH & Co.

Адаптований переклад українською та технічне редагування:

Володимир Павловський, к.т.н, с.н.с., Інститут електродинаміки НАН України

Модуль SKiiP 4 (рис. 1) від Semikron Danfoss тепер оснащений новим високопродуктивним охолоджувачем із ребрами спеціальної форми, який оптимізовано для конструкцій без базової плити та для різноманітних конфігурацій площ діода і чипа IGBT, що забезпечують значні переваги у функціонуванні як зі сторони генератора, так і, наприклад, в мережі компактних перетворювачів для вітроенергетики.

Впродовж більше 20-ти років їх застосування інтелектуальні інтегровані силові модулі Semikron Danfoss, також відомі як модулі SKiiP, довели, що вони є надійним рішенням для перетворення електроенергії, пропонуючи високий рівень інтеграції при компактних розмірах. На додаток до, власне, силових електронних компонентів — IGBT і діодів SEMIKRON CAL4F у напівмостовій конфігурації, модулі SKiiP мають у своєму складі драйвер із затвором для надійної ізоляції сигналу, надточні датчики струму та напруги, ефективний радіатор і можуть виконувати різноманітні функції захисту.

Еволюцію цих інтелектуальних силових модулів можна відслідкувати, аналізуючи ринок перетворювачів для вітроенергетики з його постійно змінюваними та зростаючими вимогами, які

завжди спонукали до розвитку та вдосконалення технології SKiiP. Для того, щоб нормально функціонувати в нерідко несприятливих умовах зовнішнього середовища, силова електроніка має бути надійною та стійкою. Завдяки інноваційним технологіям виготовлення, таким як спікання та з'єднання без пайки, новий модуль SKiiP 4 цілком відповідає цим вимогам.

СТРУКТУРА МОДУЛЯ SKiiP 4

Модуль SKiiP 4 побудований без базової плити; його притискають безпосередньо до верхньої частини охолоджувача. Між ними знаходиться попередньо нанесений тонкий шар високоефективного теплопровідного матеріалу. На рисунку 2 показані основні компоненти напівмосту SKiiP 4. (у конфігурації напівмосту)

Підкладка DCB (Direct copper bonding) модуля SKiiP 4, яка показана на рисунку 2, містить дві половини, до яких спікають IGBT і діоди; її притискають до радіатора компоненти, що лежать над нею. Конструкція напівмосту забезпечує рівномірний розподіл механічних зусиль у напрямку згори-вниз, від притискної частини на сендвіч-конструкцію силових шин. Цьому сприяє шар прес-піни. Сендвіч-конструкція силових шин утворена з плоских провідників, розташованих один над одним, з ізоляційними прокладками

між ними. Тиск передається на підкладку DCB, розташовану нижче; вона, у свою чергу, рівномірно притискається до верхньої охолоджувача.

Традиційні конструкції модулів, у яких використовується шар міді на підкладці та притискне з'єднання для розділення сигналів, передбачають низку технічних компромісів. Модуль SKiiP 4, навпаки, має три додаткові рівні, які забезпечують однаково ефективну передачу таких сигналів, як (+) і (-) напруги постійного струму, а також вихід напруги змінного струму (AC) на підкладку (DCB). Сендвіч-конструкція забезпечує наднизьку індуктивність шин в силовому модулі, а багатопальцеві контакти забезпечують передачу сигналів «вниз» до визначених точок на підкладці (DCB). Крім наднизької індуктивності шин від силового входу і до чипів, ще однією важливою перевагою сендвіч-конструкції з кількома пальцями є однорідний розподіл напруг та струмів вздовж підкладки (DCB). Це дозволяє одержати дуже рівномірний розподіл статичних і, що більш важливо, динамічних навантажень на окремі чипи.

Завдяки таким конструктивним рішенням напівміст SKiiP 4 забезпечує низку переваг порівняно зі звичайними конструкціями модулів у сильнострумівих застосуваннях, однією з яких є його надзвичайна міцність — ключовий параметр, який ще більше покращується завдяки спеціально розробленому повністтю цифровому драйверу SKiiP 4. Вся логічна схема драйвера інтегрована в розроблених SEMIKRON модулях ASIC (Application-specific integrated circuit, «інтегральна схема для специфічного застосування»), які використовують лише декілька зовнішніх компонентів і якими керує високошвидкісний процесор. Для виявлення небезпечних ситуацій драйвер використовує температуру

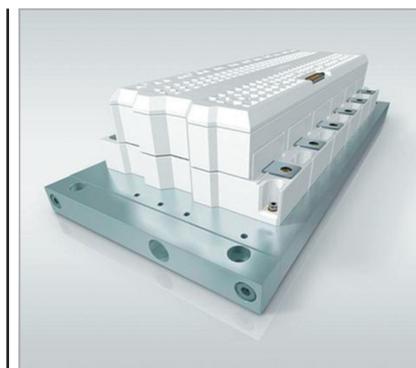


Рис. 1. Модуль SKiiP 4

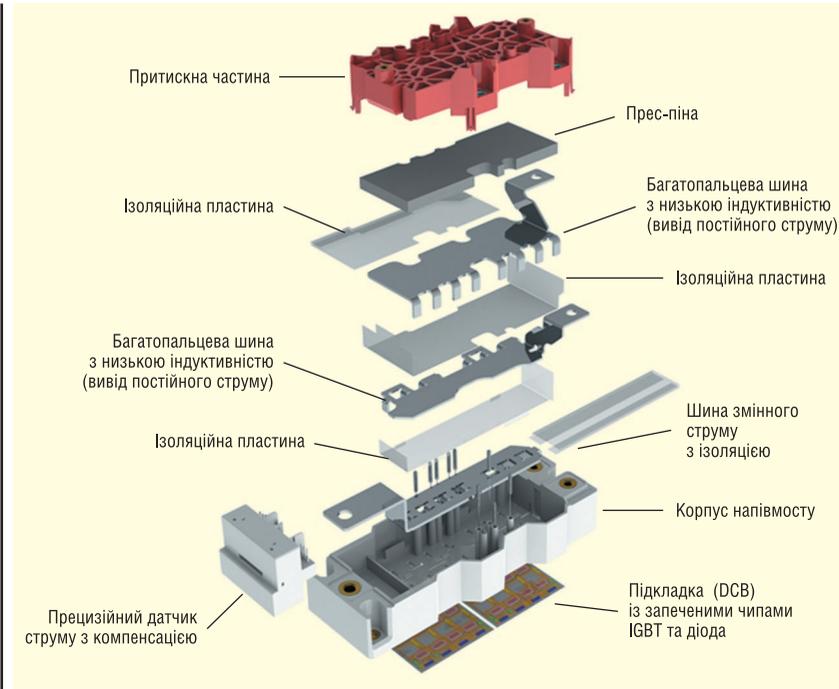


Рис. 2. Напівміст SKiiP 4 в розгорнутому вигляді

підкладки DCB, температуру самого драйвера, інформацію від інтегрованих швидкодіючих і точних датчиків струму у колі зворотного зв'язку, а також відслідковує вихід з насичення IGBT. За необхідності драйвер може ініціювати м'яке відключення IGBT і надіслати повідомлення про стан несправності системі керування через цифровий інтерфейс.

Через інтерфейс шини CAN можна встановити багато параметрів, захисних функцій і безпечних порогів спрацьовування, забезпечуючи високий рівень гнучкості та змін у конфігурації. Модуль SKiiP 4 також має режим «Подолання несправності» (Fault Ride Through (FRT)), який можна за потреби активувати, як це часто буває у за-

стосуваннях для індукційного генератора з подвійним живленням (double fed induction generator, DFIG). Програмований цифровий драйвер дає можливість споживачам застосовувати просто безліч варіантів конфігурації через інтерфейс CAN і поставляється з заводу з широким набором регульованих, гнучких опцій, що дозволяє реалізувати навіть найбільш незвичні або специфічні функції, потрібні клієнту; також можливі різноманітні варіанти дизайну інтерфейсу.

НАДІЙНІСТЬ І СТІЙКІСТЬ

Окрім надійності самого напівмосту SKiiP 4 і багатьох різноманітних функцій захисту драйвера, значний вплив на його надійність у польових умовах мають інші фактори, тобто умови навколишнього середовища, або, іншими словами, як силові модулі працюють у реальних умовах експлуатації, включаючи можливі фактори впливу, що діють на компоненти. На ринку перетворювачів для вітроенергетики важливу роль відіграють вологість і температура, а також здатність витримувати циклічні навантаження. Можливості модуля SKiiP 4, розробленого в основному на основі кліматичних умов класу 3К3, були значно розширені у ключових напрямках, як видно на графіку температури/вологості (рис. 3).

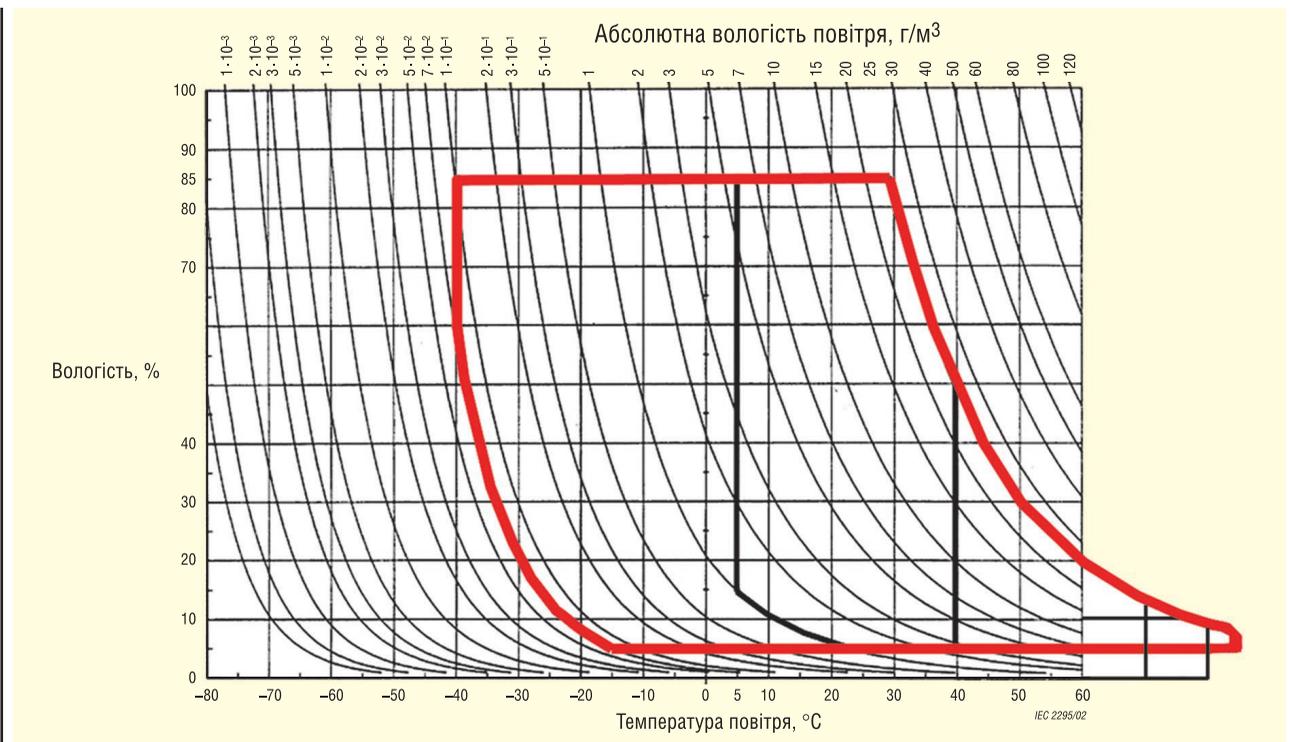


Рис. 3. Кліматичні умови класу 3К3 (чорний колір) і розширена область, досягнута SKiiP 4 (червоний колір)

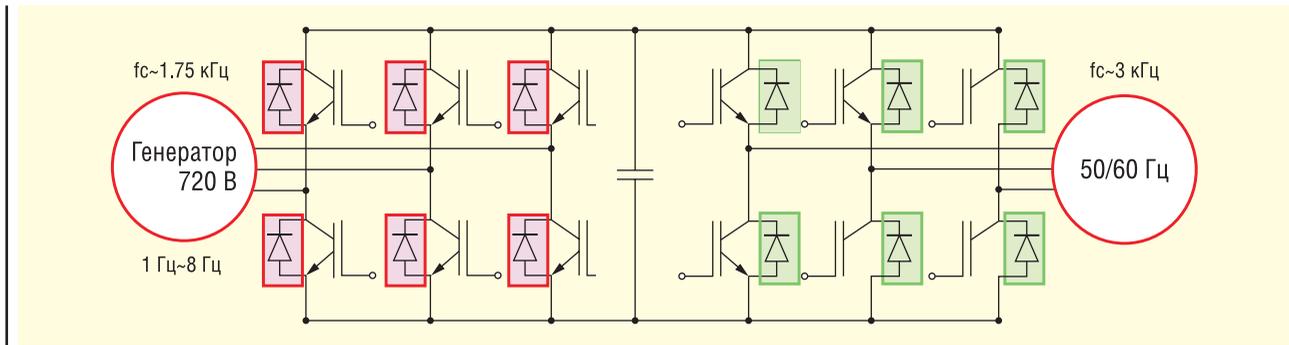


Рис. 4. Повномасштабна топологія back-to-back перетворювача

Для областей високих і низьких температур модуль SKiiP 4 (червона лінія) розрахований на роботу в умовах навколишнього середовища, що виходять далеко за межі класу ЗКЗ (чорна лінія), підкреслюючи надійність модуля з його інтегрованим силовим каскадом, драйвером та інтегрованими датчиками струму, в тому числі для роботи в офшорних (морських, прибережних) вітрових установках. Насправді умови, в яких працюють вітрові електростанції, не повністю охоплюються класом експлуатації ЗКЗ. Реальні кліматичні умови, що інколи виникають, є однією з відомих причин деяких передчасних відмов обладнання після багатьох років безперебійної роботи. Розробка та відповідний вибір компоновки модуля може допомогти значно знизити інтенсивність відмов, що підтверджено статистичними даними щодо інтенсивності відмов модуля SKiiP 4 у порівнянні з інтенсивністю відмов силових модулів із меншою кількістю захисних функцій. Це стосується не тільки термостійкості або вологостійкості, але і стійкості до циклічності навантаження, що є ключовим параметром при конструюванні силових модулів, особливо для силових електроніки зі сторони генератора.

За кількома винятками, більшість сучасних вітрових турбін використовують back-to-back перетворювачі (рис. 4): перетворювачі з боку мережі, які працюють на частоті 50/60 Гц, і перетворювачі з боку генератора, які зазвичай працюють на частотах починаючи з кількох герц (DFIG і Direct Drive) до частот понад 100 Гц (для застосувань з постійними магнітами та індукційними генераторами).

Тут робота на низьких частотах може спричинити відчутне коливання температури в компонентах силовій електроніки, оскільки на цій частоті генератора струм навантаження по черзі керується діодами та IGBT. Через обмежену теплоємність, яку можна розділити

між діодами та IGBT, підвищення температури буде тим більшим, чим менша вихідна частота. Для силового модуля на боці генератора це призводить до значного зростання циклічного навантаження, що впливає на механічне з'єднання між самим чипом і з'єднанням з підкладкою (DCB), а також на провідники, які з'єднують між собою компоненти силового модуля, що призводить до передчасного виходу з ладу цих компонентів. Більше того, з'єднання «DCB-чип великої площі» особливо чутливе до фактори впливу, спричинених циклічною зміною навантаження.

СПІКАННЯ

Ще в 2007 році компанія SEMIKRON розробила процес спікання, який можна використовувати для з'єднання чипів, і вперше застосувала спікання в серійному силовому модулі SKiiP 4. У цьому процесі замість звичайного паяного з'єднання між чипом та підкладкою (DCB) застосовують срібний порошок для спікання, температура плавлення якого приблизно в чотири рази перевищує температуру звичайного припою, і який розплавляють під тиском в умовах чистого приміщення. В результаті створюється надзвичайно міцне та довговічне з'єднання між металізованою нижньою частиною чипа та металеву поверхню підкладки (DCB).

Однак у спікання є свої проблеми. Вони пов'язані з тонкою структурою кремнієвих чипів і величезним тиском, який діє на компоненти. Тим не менше перевірка кількості циклів навантаження, які можуть витримувати з'єднання спіканням, показує, що їх здатність до циклічного навантаження у шість-вісім разів вища, ніж у звичайних паяних з'єднань. Тому з'єднання компонентів модуля спіканням має вирішальне значення, коли необхідно досягти високого ступеня надійності, і воно абсо-

лютно необхідне для перетворювачів вітроенергетики, особливо зі сторони генератора. Процес спікання, який використовує SEMIKRON, постійно вдосконалюється з метою подальшого підвищення надійності.

На додаток до високої здатності витримувати циклічні навантаження, важливу роль у забезпеченні та надійної роботи перетворювача відіграє також максимальна температура р-п переходу чипів, що вимагає ефективного розсіювання їхніх теплових втрат.

ОХОЛОДЖЕННЯ

На сучасному ринку перетворювачів для промисловості та інверторів для систем сонячної енергетики найпоширенішим рішенням є системи повітряного охолодження. Коли йдеться про використання енергії вітру, охолоджувачі водою виявилися найефективнішими завдяки високій здатності відводити тепло та продуктивності, яким мають відповідати перетворювачі, які використовуються для потреб вітроенергетики. Модулі SKiiP поставляються як з водяним, так і з повітряним охолодженням.

ВИСОКОПРОДУКТИВНИЙ ОХОЛОДЖУВАЧ (HIGH-PERFORMANCE COOLER, HPC)

З початку 2021 року модуль SKiiP 4 оснащений спеціально розробленим високопродуктивним водяним охолоджувачем із ребрами спеціальної форми як альтернативою існуючому водяному охолоджувачу. Два різних водяних охолоджувачі модуля SKiiP 4, які оптимізовані для модуля SKiiP 4 без базової плити, показані на рисунку 5.

Тепловий опір чипів з охолоджувачем стандартної форми (рис. 5а) достатньо сильно залежить від положення

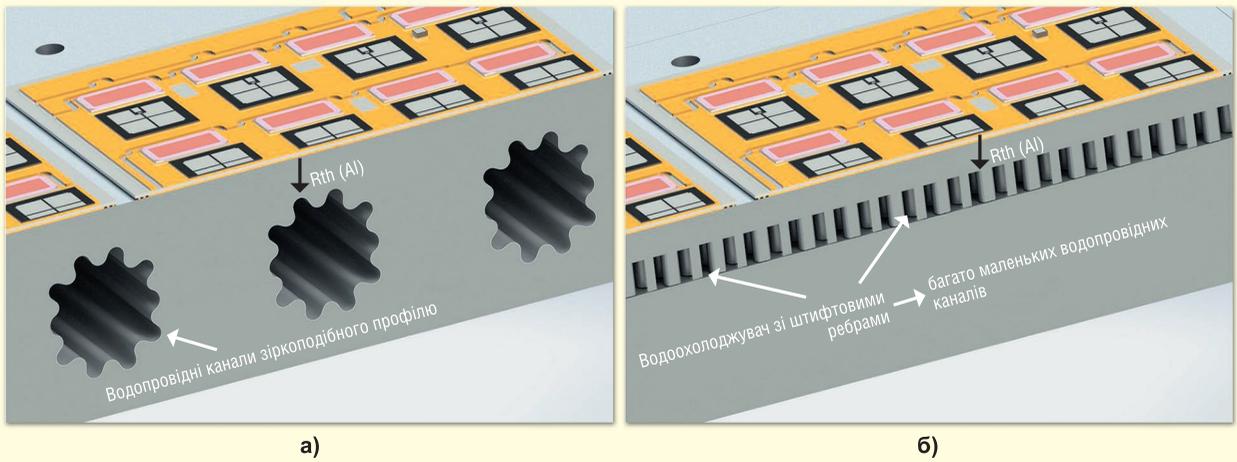


Рис. 5. Стандартний охолоджувач з ребрами у формі зірки (а); новий високопродуктивний охолоджувач (НРС) (б)

чипів. Це пояснюється різною відстанню між кожним із чипів та водяними каналами в такому охолоджувачі. Із-за виробничих обмежень шлях, по якому тепловий потік від IGBT і діодів розповсюджується через алюміній до водяного каналу, є відносно довгим.

Нова конструкція високопродуктивного охолоджувача із ребрами спеціальної форми забезпечує набагато ефективніші умови охолодження чипа. Поперечний переріз охолоджувача показує, що відстань проходження тепла від чипів до води значно коротша та розподіляється набагато однорідніше по всій підкладці DCB для всіх чипів. Геометрію фінальної конструкції ребра було оптимізовано для відповідних розмірів чипів та їх розташування на модулі напівмосту SKiiP 4 без базової пластини. У результаті тепловий опір чипів, встановлених на DCB з високопродуктивним охолоджувачем, приблизно вдвічі менший, ніж у стандартного водяного охолоджувача за аналогічної швидкості потоку води, а допустима втрата тиску води лише трохи вища.

Для нового модуля SKiiP 4, встановленого на високопродуктивному охолоджувачі, це означає збільшення вихідного струму приблизно на 25%, тобто збільшення потужності на 25% за такого самого зростання температури на проміжку між *p-n*-переходом чипа та водою. На **рисунку 6** показана максимальна температура *p-n*-переходу як функція вихідного струму для стандартного охолоджувача (NHC300) і нового охолоджувача НРС.

Ці дані були отримані за допомогою веб-програми моделювання SEMIKRON SemiSel V5 і вони стосуються нового модуля SKiiP2414GB17E4-4DUHP з охолоджувачем НРС та параметрами

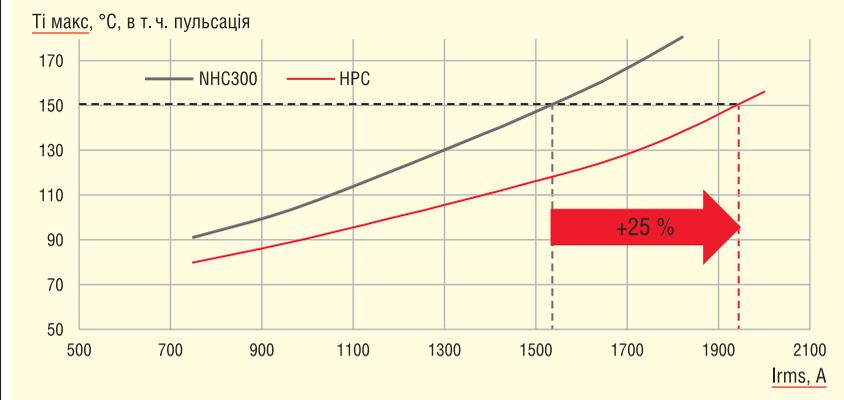


Рис. 6. Збільшений вихідний струм із SKiiP 4: допустимі струми зі стандартним охолоджувачем NHC300 і новим охолоджувачем НРС

$V_{DC} = 1150 \text{ В}$, $m = 0.85$, $\cos(\phi) = 0.85$, $f_{sw} = 2.5 \text{ кГц}$, $T_w = 55 \text{ °C}$ (16 л/хв., холодоагент — розчин 50% етиленгліколю).

Однією з головних причин, чому стало можливим таке значне збільшення потужності, є скорочення шляхів від точок, де відбуваються втрати потужності в чипі, до води; іншими словами, збільшення потужності стало можливим тому що в конструкції вдалося обійтися без додаткової базової пластини. Це означає, що можна створити більш компактні перетворювачі з набагато більшою питомою потужністю за набагато вигіднішими цінами за одиницю потужності.

Для модулів SKiiP, які вже широко використовуються у перетворювачах для вітроенергетики провідних світових виробників, це фактично відкриває можливість їх дооснащення в рамках оновлення. Тобто в уже існуючій вітрової установці можна замінити стандартний модуль SKiiP новою модифікацією цього модуля, яка сумісна з точки зору механічної конструкції, але забезпечує на 25% більше потужності. В результаті можна одержати значне збільшення ви-

хідної потужності з мінімальними затратами часу та зусиль.

Двостороння конструкція охолоджувача з модулем SKiiP 4 з кожного боку (однозначно, з усіх сторін) (рис. 7) сприяє подальшому збільшенню питомої по-

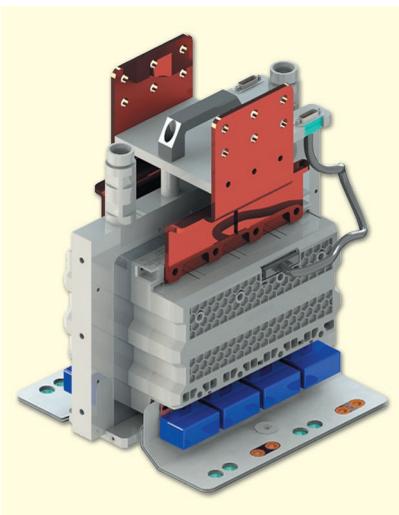


Рис. 7. Подвійний модуль SKiiP з охолоджувачем НРС

тужності. При її правильному розташуванні це також може полегшити доступ до ланки постійного струму.

Для кращого уявлення про те, як двосторонній модуль SKiiP 4 може бути сумісним з конструкцією ланки постійного струму (вона тут не показана), наприклад, у вигляді збірки, на рисунку 6 показані деякі з опційних додаткових частин, а саме сендвіч-конструкція шин для DC(+) і DC(-), що з'єднує двосторонній SKiiP з ланкою постійного струму, двома лініями водопостачання та монтажним кріпленням. Двосторонній високопродуктивний охолоджувач (*double-sided high-performance cooler, DHPC*) має дві окремі внутрішні ділянки з ребрами спеціальної форми, які з'єднані паралельно, тобто він працює так само, як два незалежних охолоджувачі НРС, і його роботу можна легко моделювати за допомогою програми SemiSel V5.

Така конструкція може полегшити доступ до ланки постійного струму, за умови, що один модуль SKiiP розташований з одного боку від DHPC, напр. біля однієї фази генератора, а другий модуль SKiiP з другого боку DHPC працює з фазою мережі. Це гарантує, що частина струму проходить по найкоротшому шляху зі сторони генератора через ланку постійного струму на сторону мережі. Крім того, таке розташування зменшить втрати і пульсації струму у конденсаторі ланки постійного струму, у порівнянні з окремо виділеним генератором і перетворювачем на стороні мережі, що розташовані на деякій відстані один від одного.

АСИМЕТРИЧНЕ РОЗТАШУВАННЯ ЧИПІВ

Через порівняно низькі частоти на стороні генератора та високі частоти на стороні мережі, а також через потрібну полярність напруги постійного струму вимоги, яким мають відповідати силові каскади, можуть суттєво відрізнятися. Залежно від типу використовуваного генератора цілком може бути так, що для генератора знадобляться набагато потужніші та, як наслідок, більші за розмірами діоди, ніж ті, що застосовуються у стандартних модулях. Найбільш очевидним варіантом було б додати більшу кількість стандартних напівмостів і передбачити для діодів додаткове місце, необхідне для їх розміщення. Однак таке рішення збільшило б загальний об'єм і означало б, що площа

для чипів IGBT, за яку платить споживач, не використовується; тому такий підхід не є бездоганним.

Завдяки унікальній конструкції шини з кількома пальцевими відводами та надзвичайно рівномірному розподілу струму по підкладці DCB, напівміст модуля SKiiP 4 має одну дуже важливу перевагу перед конструкціями звичайних модулів. Загальна площа, виділена у чипі для діодів, може бути збільшена на підкладці DCB без серйозних небажаних ефектів перерозподілу струму на цій підкладці. На практиці це означає, що вперше в силовому електронному модулі можливі варіації виконання стандартного напівмосту SKiiP 4 згідно з конкретними потребами замовника або для конкретних особливостей застосування модулів, і, завдяки можливості асиметричного розташування чипів, що дало змогу отримати необхідний розподіл струму між чипами IGBT та чипами діодів. За потреби початковий об'єм для розміщення діодів можна навіть збільшити до 50% без необхідності застосовувати додатковий напівміст.

Розглянуті вище підходи мають особливий сенс у генераторах, які виробляють високі вихідні напруги вже при низькій номінальній частоті. Практика показала, що збільшенням місця для розташування діодів в напівмості SKiiP 4 лише в межах від 13 до приблизно 20% можна легко досягти необхідної довговічності модулів завдяки їх високій стійкості до циклів високих навантажень, що, в свою чергу, є результатом застосування з'єднань спіканням всередині модулів.

Двосторонній високопродуктивний охолоджувач у поєднанні з асиметричним розташуванням чипів є ключовим технічним рішенням, яке робить силові модулі компактнішими та гнучкішими для використання, що дозволяє скоротити витрати сировини та досягти величезної економії коштів.

Більш детальну інформацію щодо продукції Semikron Danfoss можна отримати, звернувшись до офіційного дистриб'ютора в Україні — ТОВ НВП «Техносервіс-привід»:

**03057, м. Київ,
пр-т Берестейський, 56,
офіс 335,
тел. +38 (044) 458-47-66,
e-mail: sp.tsdrive@gmail.com,
www.tsdrive.com.ua,
https://semismart.com.ua** CN

СТВОРЕНО РЕКОРДНУ ЗА ГУСТИНОЮ ЕНЕРГІЇ ЛІТІЙ-ПОВІТРЯНУ БАТАРЕЮ

Багато власників електромобілів мріють про акумулятор, якого вистачало б на півтори тисячі кілометрів без підзаряджання. Фахівці з Аргонської національної лабораторії Міненергетики США розробили літій-повітряну батарею, яка одного дня зможе живити регіональні літаки і фури. Вони домоглися найвищої на сьогодні густини енергії для елементів живлення такого типу.

Основний компонент нової літій-повітряної батареї — твердотілий електроліт. На відміну від рідких, вони не схильні до протікання і займання, тобто набагато безпечніші. Але це ще не все — хімія нової батареї дає змогу збільшити густину енергії чвертеро порівняно з літій-іонною. Це означає, що запас ходу акумулятора стане в рази більшим.

«У цієї літій-іонної батареї найвища задана густина енергії серед будь-яких батарей, які вважаються наступним поколінням після літій-іонних», — заявив Ларрі Кертісс.

У літій-повітряних батареях попередніх конструкцій літій у літій-металевому аноді рухався через рідкий електроліт, щоб у процесі розряджання з'єднатися з киснем і перетворитися на пероксид літію або супероксид літію на катоді. Під час заряджання пероксид або супероксид знову розщеплюється на літій і оксид.

Новий твердотілий електроліт складається з керамічного полімерного матеріалу з відносно недорогих елементів у вигляді наночастинок, повідомляє Phys.org. У результаті хімічної реакції у фазі розряджання виробляється оксид літію. Суть у тому, що в реакції з супероксидом або пероксидом літію на одну молекулу кисню припадає один або два атоми електрона, тоді як у випадку оксиду літію — чотири. Чим більше електронів — тим вища густина енергії.

Вченим вдалося розробити першу літій-повітряну батарею, здатну досягти чотириелектронної реакції за кімнатної температури. Також вона може працювати з киснем, отриманим із повітря навколишнього середовища. Це дасть змогу відмовитися від кисневих балонів. А випробування показали, що нова батарея здатна витримувати до 1000 циклів зарядки-розрядки без втрати стабільності.

<https://phys.org/>