

# Компактні модулі IGBT MiniSKiiP: інструкція із застосування

**Френк Стіглер (Frank Stiegler), Томас Гертген (Thomas Hurtgen)**  
Адаптований переклад українською та технічне редагування:  
**Сергій Поліщук, к.т.н.**  
E-mail: sp.tsdrive@gmail.com

**Компактні модулі сімейства MiniSKiiP надзвичайно популярні на ринку силової електроніки. Сьогодні понад 20 млн таких силових схем працює в частотних перетворювачах провідних європейських виробників: Miller Electric, Schneider Toshiba Group, SEW Eurodrive, Siemens A&D, Silectron, Danfoss, Vacon. Близько 70% цих пристроїв — електропривод, виконавчі механізми промислових роботів, пресів і компресорів потужністю 5–40 кВт. Поява нових напівмостових модулів MiniSKiiP Dual дає змогу розширити діапазон до 100 кВт і більше, тепер вони можуть успішно конкурувати зі стандартними IGBT [1, 2].**

## ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

У конструкції компонентів сімейства MiniSKiiP використано технологію притискного контакту, що забезпечує надійну роботу в жорстких умовах і високу стійкість до термоцикування. Силові модулі, орієнтовані на застосування в приводах потужністю понад 100 кВт, можуть містити різні конфігурації схем, включно з CIB (випрямляч, інвертор, гальмівний каскад). Наявність вбудованого термодатчика (терморезистора) дає змогу контролювати температуру підкладки та вимикати силовий каскад у разі перегрівання.

У конструкції MiniSKiiP використана керамічна DCB-підкладка  $Al_2O_3$  (напруга ізоляції 2.5 кВ AC/1 хв), що забезпечує ефективне відведення тепла на радіатор. Завдяки високій густині струму, застосуванню узгоджених за ТКР матеріалів і притискної технології збирання, модулі MiniSKiiP стають оптимальним варіантом для застосування в надійних компактних приводах малої та середньої потужності.

## MiniSKiiP: основні особливості та топології схем

- Чотири типи корпусів (рис. 1);
- номінальний струм: 4–400 А;

- новітні технології IGBT/FWD і випрямних діодів з робочою напругою 600/650, 1200 і 1700 В;
- конфігурації схем: CIB, трифазний інвертор, здвоєний трифазний інвертор, H-міст, напівміст, 3L NPC/TNPC, некеровані та напівкеровані мости з гальмівним чопером;
- пружинні контакти для сигнальних і силових підключень;
- з'єднання з радіатором і платою керування за одну технологічну операцію одним або двома гвинтами;
- безбазові модулі з технологією притискного контакту;
- вбудований PTC- або NTC-термодатчик.

Конфігурації схем, представлені на рисунку 2, дають змогу використовувати компоненти серії MiniSKiiP у широкому класі електроприводів потужністю від одиниць до десятків кВт. Усі топології схем і модулі MiniSKiiP включені в базу програми теплового розрахунку SEMISEL V5 [8].

## MiniSKiiP: кваліфікаційні тести, умови експлуатації

У таблиці 1 перераховано види тестів на надійність і відповідні стандарти, що підтверджують готовність продук-



**Рис. 1. Типи корпусів модулів MiniSKiiP, модуль трифазного інвертора на базі MiniSKiiP Dual**

ції до серійного виробництва. Подібним випробуванням піддаються всі нові та/або доопрацьовані модулі, їхній обсяг може бути розширено для конкретних видів компонентів залежно від умов застосування.

Компоненти сімейства MiniSKiiP кваліфікуються відповідно до IEC/TR 60721-4-1, їхнє зберігання здійснюється в оригінальному пакуванні (без попереднього нанесеного шару TIM) протягом двох років в умовах кліматичного класу 1K21 (IEC 60721-3-1):

- температура зберігання: +5...+40 °С;
- відносна вологість: 5–85 %;
- абсолютна вологість: < 25 г/м³.

**MINISKIIP: ОСОБЛИВОСТІ КОНСТРУКЦІЇ**

**Контактна система**

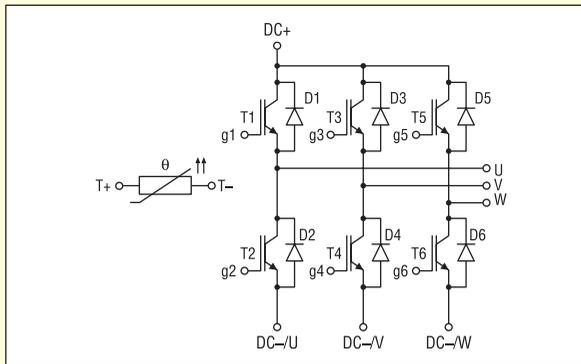
Унікальність компонентів сімейства MiniSKiiP полягає у використанні пружинних виводів для силових і сигнальних підключень. Характеристики такого з'єднання (контактний опір) за різних струмів визначаються комбінацією властивостей матеріалів покриття пружин і

майданчиків друкованої плати (PCB). Для відповідності екологічним директивам RoHS рекомендується використовувати такі технології покриття PCB:

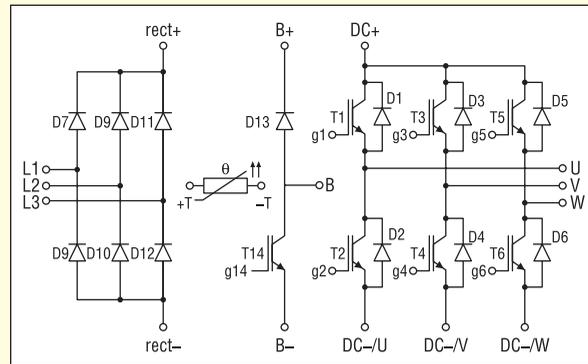
- сплав нікель-золото (NiAu);
- олово з вирівнюванням гарячим повітрям (HAL Sn);
- хімічне олово (Chem. Sn).

Під час виготовлення друкованих плат для MiniSKiiP не слід використовувати органічну OSP пасивацію (Organic Solderability Preservatives). Така технологія не здатна забезпечити тривалий захист від корозії, шар OSP майже повністю зникає після пайки або 6-місячного зберігання.

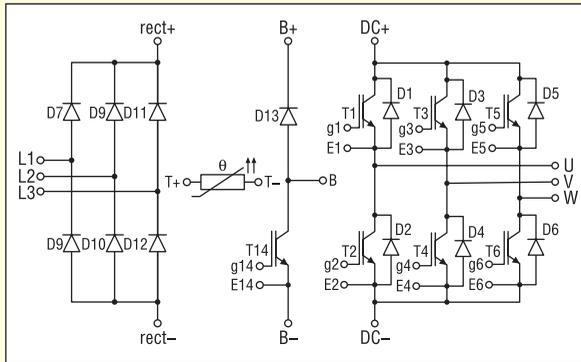
До товщини олова не висувається жодних особливих вимог, підходять будь-які стандартні безсвинцеві технології, такі як HAL і Chem Sn. Через відхилення в процесі виробництва друкованих плат і використання декількох циклів опалення може трапитися, що шар олова буде сточений завдяки зростанню інтерметалічної фази під час монтажу модуля. При цьому для функціонування пружинної контактної системи MiniSKiiP в межах специфікації нанесення додаткового шару олова не потрібне. Інтерметалічна фаза також забезпечує довготривалий захист мідних трас на PCB від окислення.



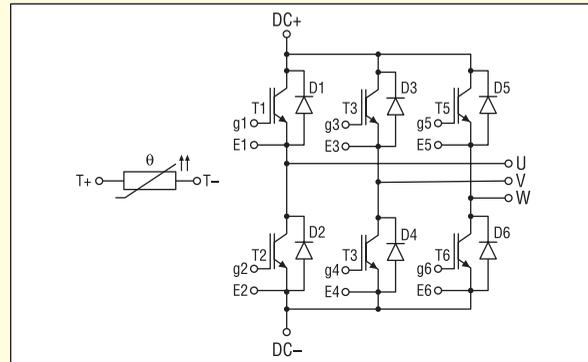
Трифазний інвертор з відкритими емітерами (AC)



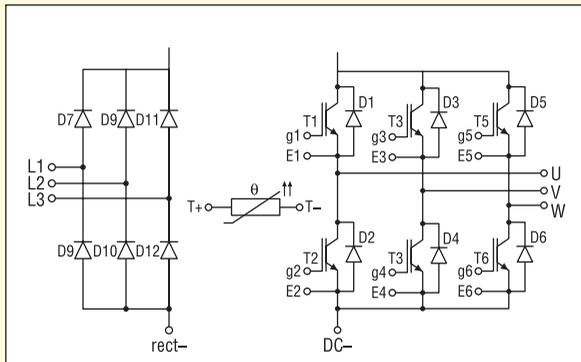
СІВ з відкритими емітерами (NAB)



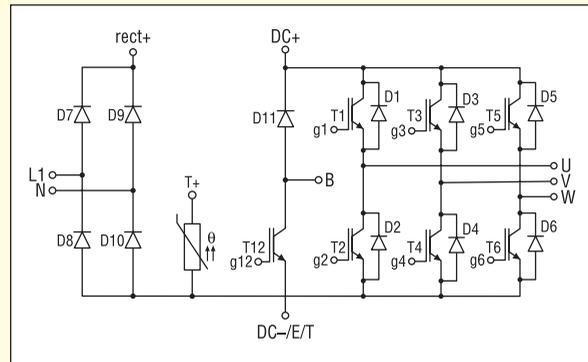
СІВ зі спільним емітером (NAB)



Трифазний інвертор зі спільним емітером (AC)



Трифазний випрямний міст і трифазний інвертор (NAC)



Однофазний випрямний міст, гальмівний чопер і трифазний інвертор (NEB)

**Рис. 2. Топології схем MiniSKiiP**

Таблиця 1. Тести на надійність SEMIKRON, умови проведення та стандарти	
Вид випробувань, стандарт	Умови тестування
Зворотний зсув за високої температури (HTRB) IEC 60747-9:2007	1 000 год
	95% $V_{CE\_max}$
	$T_I = +150\text{ }^\circ\text{C}$ для старих поколінь чипів $T_I = +175\text{ }^\circ\text{C}$ для старих поколінь чипів
Зворотний зсув за високої температури (HTRB)* IEC 60747-9:2016	1 000 год
	66% $V_{RRM}$ $T_s = T_{I\_max} - 20\text{K}$
Зміщення затвора за високої температури (HTGS) IEC 60747-9:2007	1 000 год
	$\pm V_{GES\_max}$ $T_{I\_max}$
Зворотний зсув (високовольтний) за високої температури та високої вологості (HV-H3TRB)** IEC 60749-5:2018	1 000 год
	$T_a = +85\text{ }^\circ\text{C}$ , RH = 85% 80% $V_{CE\_max}$
Зберігання за високої температури (HTS) EN 60068-2-2:2008 IEC 60749-6:2002; зберігання за низької температури (LTS) EN 60068-2-1:1993 + A1:1993 + A2:1994	1 000 год $T_{stg\_max} / T_{stg\_min}$
	100 циклів $T_{stg\_max} - T_{stg\_min}$
Пасивне Термоциклування (TC) EN 60068-2-14:2010	> 70 тис. циклів за $\Delta T = 70\text{K}$
Активне Термоциклування (PC) EN 60749-34:2010	20...500 Гц, синусоїдальні
Вібрації IEC 60068-2-6:2008	5g, 2 год по кожній осі (x, y, z)
Удари	Напівсинусоїдальні імпульси 18 мс
IEC 60068-2-27:2010	30g, 3 рази по кожній осі ( $\pm x, \pm y, \pm z$ )
<b>Примітка:</b> * для стандартних тиристорів і випрямних діодів зі скляною пасивацією чипів; ** для покоління IGBT T7 або вище.	

Найкращими контактними властивостями володіють пружини зі срібним покриттям, при цьому оптимальним матеріалом покриття майданчиків PCB вважається сплав NiAu. Для забезпечення функціональності дифузійного бар'єра Ni товщина нікелевого покриття має бути не менше 5 мкм.

### Дизайн друкованої плати

Відповідальність за проектування друкованих плат лежить на замовнику, який зобов'язаний дотримуватися відповідних правил. Зокрема, дизайн DC-шин повинен забезпечувати мінімальну розподілену індуктивність, тому траси -DC/+DC слід виконувати плоско-паралельними з максимальною можливою площею міді. Сигнальні кола затвора та емітера також потрібно прокладати паралельно і близько один до одного. Стандартна притискна

кришка MiniSKiiP має певні порожнини, що дозволяють встановлювати під нею SMD-компоненти з максимальною висотою 3.4 мм. При цьому слід переконаватися, що вони не конфліктують з контактними точками кришки MiniSKiiP. Як матеріал PCB може бути використаний FR 4, товщина мідних шарів — за стандартом IEC 326-3.

Компоненти встановлюються на друковану плату за допомогою пайки хвилею, оплавлення або селективної пайки. Посадкові майданчики для пружинних контактів мають бути вільні від будь-яких забруднень, як-то припій, флюс, пил, жир або інші речовини. Під час паяння хвилею компонентів, розташованих на нижньому боці PCB, контактні майданчики потрібно захищати від бризок припою за допомогою металевого трафарету. У разі використання клейкої стрічки для маскування

посадкових майданчиків виключається можливість потрапляння клею, що погіршує якість контакту. На контактних майданчиках не повинно бути наскрізних отворів із покриттям (перехідних отворів), наявність яких погіршує властивості притискного з'єднання.

### Пружинні контакти

- Матеріал: сплав K88;
- покриття: срібло (Ag), товщина 1–5 мкм; контактний майданчик (верхній і нижній шар), товщина 3–5 мкм;
- захист поверхні: металева пасивація, товщина < 0.1 мкм.

Базовий матеріал K88 — це високоякісний сплав, розроблений фірмами Wieland Werke і Olin Brass для застосування в конекторах. Він володіє великою межею плинності (550 МПа), дуже гарною формівністю, що допускає різкий вигин, високою електропровідністю (80% в питомих одиницях IACS), а також відмінним опором релаксації для довготривалого стабільного пружинного зусилля в діапазоні робочих температур. Протягом усього терміну служби в пружинних контактах MiniSKiiP не спостерігається втомлювальних ефектів.

Для запобігання зношування тонкої срібної поверхні, її покривають металевою пасивувальною плівкою. Такий захист пружинних контактів MiniSKiiP від потьмяніння має лише косметичну мету, він виключає сульфуріацію і потьмяніння срібла протягом приблизно пів року. Приблизно через пів року після виготовлення, залежно від товщини шару пасивації, починається знебарвлення пружин, ступінь якого може відрізнитися (рис. 3).

Знебарвлення викликане тонкими шарами сульфїду, які з часом утворюються на покріблених поверхнях. Вони дуже тонкі та крихкі, легко руйнуються під час монтажу і не погіршують електричний контакт. Таким чином, модулі MiniSKiiP зі знебарвленими пружинами можуть використовуватися без будь-яких обмежень.

Для забезпечення належного електричного з'єднання пружинний контакт має виступати над корпусом щонайменше на 0.9 мм (вимірюється від поверхні

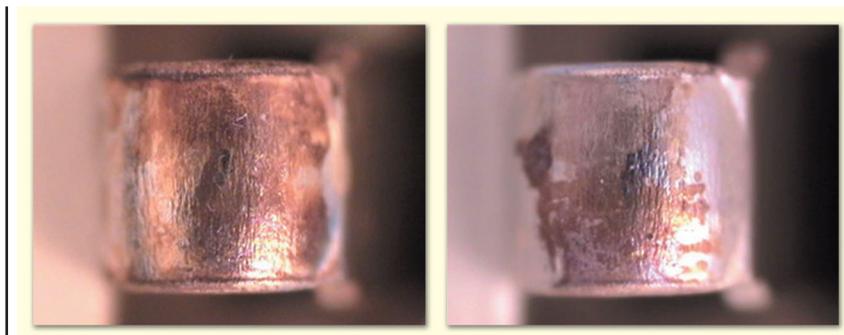


Рис. 3. Приклади знебарвлення поверхні пружин

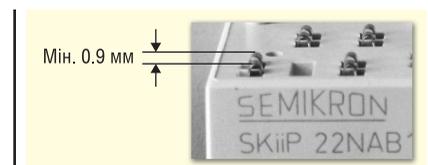


Рис. 4. Виступ пружинних контактів

корпусу до голівки пружини, рис. 4). Слід запобігти забрудненню контактів мастилом, жиром або іншими речовинами, тому не можна торкатися пружин голими руками.

**Електроміграція та утворення ниткоподібних формацій**

Для того, щоб унеможливити ризик електроміграції, SEMIKRON проводить випробування контактної системи в агресивному середовищі з високою концентрацією H<sub>2</sub>S (10 ppm), умови яких наведено в таблицях 2 і 3.

Ниткоподібні формації являють собою електропровідні кристалічні утворення, що ростуть на поверхні металу через стисну напругу, яка присутня в металевій структурі. Цей процес прискорюється при впливі агресивної атмосфери. Після тестування спостерігалось зростання ниток на краях пружин в областях з мінімальною товщиною покриття, що ніяк не впливає на ізоляційні властивості MiniSKiiP. Корпус модуля і напрямні пружин непровідні та виготовлені з пластику, тому там не може виникнути жодних проблем. Ріст ниток на голівці пружини також не є небезпечним, навпаки, їхня наявність покращує якість з'єднання пружинного контакту та майданчика PCB.

**ОБЛАСТІ БЕЗПЕЧНОЇ РОБОТИ (ОБР, SOA) IGBT**

Графіки ОБР не включають до технічних специфікацій напівпровідникових приладів, їх можна знайти в інструкціях із застосування у вигляді стандартизованих кривих, які стосуються параметрів V<sub>CES</sub> та I<sub>CRM</sub> або I<sub>Cnom</sub> (для трьох класів напруги 600, 1200 і 1700 В). На рисунку 5 показано приклад області безпечної роботи IGBT, що обмежує максимальний струм колектора (горизонтальна лінія) і напругу «колектор-емітер» (вертикальна лінія). Граничні номінальні значення струму передбачають, що чипи IGBT не нагріваються вище максимально допустимої температури (T<sub>i</sub> = +150 або +175 °C).

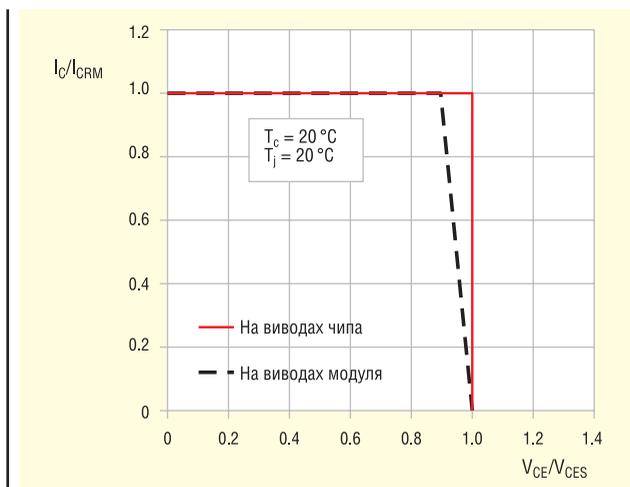
Модулі IGBT можуть працювати тільки в режимі перемикання, лінійний режим не допускається, також виключено

**Таблиця 2. Параметри тестів на електроміграцію та утворення ниткоподібних формацій**

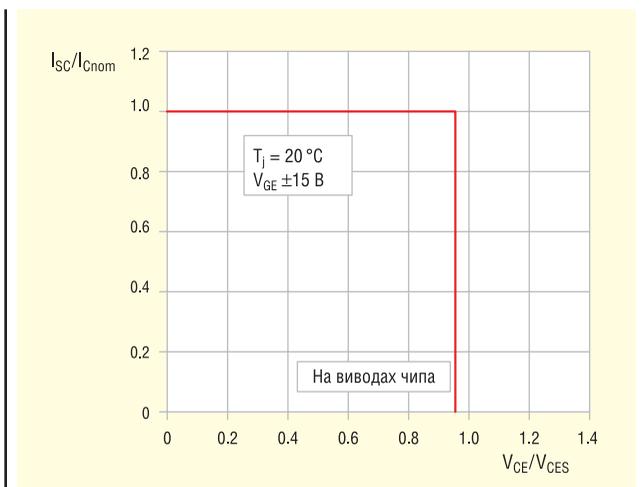
Вид випробувань	Умови проведення
Попередня підготовка	48 год, +25 °C, 75% RH, 0 В
Вплив агресивного середовища	240 год, +25 °C, 75% RH, 80 В, 10 ppm H <sub>2</sub> S
Критерій відмови	Струм витoku (стікання) > 10 мА

**Таблиця 3. Кваліфікаційні випробування на надійність пружинних контактів MiniSKiiP**

Попередній тест PCB			
	Вид тесту	Умови	Оцінка
1	Умови постачання	–	Аналіз складу матеріалів: поверхня та поперечний переріз EDX/SEM
2	Після прискореного старіння	Зберігання за високої вологості та температури	Аналіз складу матеріалів: поверхня і поперечний переріз EDX/SEM
3	Після прискореного старіння	Зберігання за високої температури	Аналіз складу матеріалів: поверхня і поперечний переріз EDX/SEM
Тест повного складання: модуль з PCB, встановлений на радіатор			
4		Зберігання за високої температури	Вимірювання контактної опору до і після тесту
5		Зберігання за високої вологості та температури	Вимірювання контактної опору до і після тесту
6		Термоцикування під струмом	Постійний моніторинг контактної опору за I = 100 мА
7		Промислова атмосфера за IEC 60068-2-60	Вимірювання контактної опору до і після тесту
8		Вібрації	Постійний моніторинг контактної опору
9		Удари	Постійний моніторинг контактної опору



**Рис. 5. ОБР для режиму ввімкнення (SOA), ОБР для режиму блокування (RBSOA)**



**Рис. 6. ОБР для режиму короткого замикання (SCSOA)**

перевищення максимального значення  $V_{CES}$ . Через внутрішню паразитну індуктивність  $L_S$ , під час комутації індукується сплеск напруги, тому її максимальне значення на силових терміналах  $V_{CEmax,T}$  має бути меншим, ніж  $V_{CEmax}$  (пунктирна лінія на рис. 5).

За певних умов IGBT здатні активно переривати стан короткого замикання (КЗ). При цьому чипи, що діють в активній робочій зоні, генерують великі втрати потужності, що призводить до підйому температури набагато вище пікового значення  $T_{j,max}$ . Однак завдяки позитивному ТКН, тобто температурному коефіцієнту напруги «колектор-емітер», струм КЗ стабілізується на рівні  $(4-6) \times I_{Cnom}$ .

Для безпечного вимкнення режиму перевантаження необхідно витримати такі граничні умови:

- допустима тривалість короткого замикання  $t_{sc}$  визначена в технічних специфікаціях (максимальна напруга на DC-шині зменшується до 360 В для IGBT 600 В і до 800 В для IGBT 1200 В);
- кількість циклів КЗ не має перевищувати 1000 протягом усього терміну служби IGBT;
- час між двома циклами КЗ має бути не менше ніж 1 с.

На рисунку 6 наведено приклад ОБР для режиму КЗ (SCSOA) за заданої швидкості вимкнення  $di/dt$ . Слід врахувати, що напруга на чипах перевищує рівень сигналу на силових виводах модуля на  $L_S \times di/dt$ , тому максимальну величину VCE необхідно скоригувати відповідним чином.

## MINISKiIP: ТЕПЛОВІ ХАРАКТЕРИСТИКИ $R_{th}$ І $Z_{th}$

Величина статичного теплового опору, що наводиться в технічних специфікаціях, заснована на результатах вимірювань:

$$R_{th(1-2)} = \Delta T / P_v = (T_1 - T_2) / P_v$$

Як видно з наведеного рівняння, різниця температур  $\Delta T$  істотно впливає на величину  $R_{th}$ , тому положення контрольних точок і метод вимірювання дуже важливі.

Оскільки модулі MiniSKiIP не мають базової плати, SEMIKRON нормує для них тепловий опір  $R_{th(j-s)}$  між кристалами і теплостокком. Цей параметр багато в чому залежить від властивостей термопасти і конструкції радіатора. Для вимірювання теплових параметрів MiniSKiIP використовуються контрольні точки, показані на рисунку 7:

- $T_j$  — так звана «віртуальна температура чипів» — середнє значення температури по поверхні кристала;
- $T_s$  — температура радіатора, вимірюється в отворі за 2 мм нижче від модуля, безпосередньо під чипом.

Детальнішу інформацію про нормування теплових опорів наведено в посібнику AN-1404 [3]. Наведені в документації значення  $R_{th}$  можуть бути використані для визначення стаціонарних теплових режимів. Для детальніших і точніших розрахунків з урахуванням перехідних процесів важливо створити динамічну теплову модель радіатора, що враховує низку чинників, зокрема положення чипів.

Під час увімкнення «холодного» модуля величина  $R_{th}$  виявляється меншою за статичне значення, зазначене в технічній специфікації, що пов'язано з наявністю внутрішніх теплових ємностей модуля. У перший момент вони є «незарядженими», а їхній «заряд» відбувається за рахунок теплової енергії, що виникає через генерацію втрат під час роботи напівпровідникового приладу. При цьому значення  $R_{th}$  зростає, тому для визначення динаміки процесу вводиться поняття динамічного

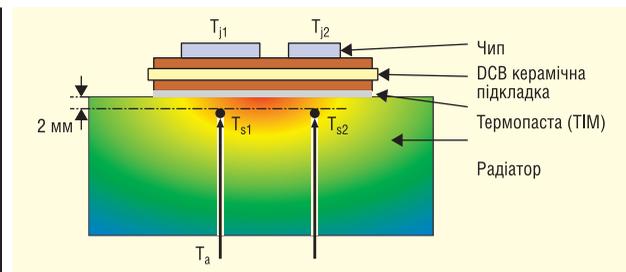


Рис. 7. Контрольні точки для вимірювання теплових опорів

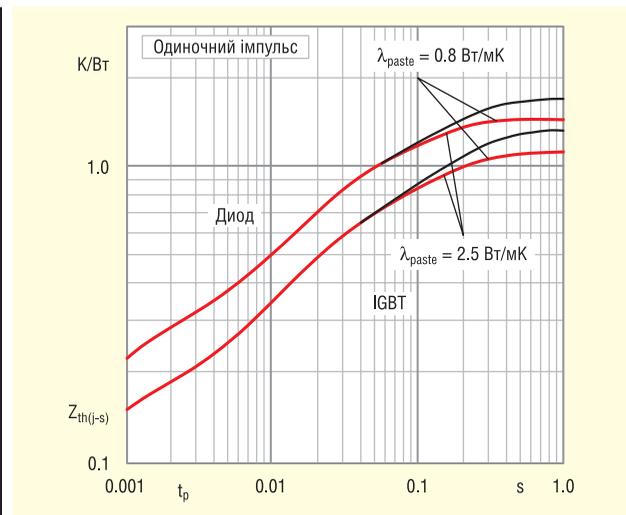


Рис. 8.  $Z_{th}$  — динамічний тепловий імпеданс (з термопастою Wacker P12 і HPTP)

теплого імпедансу  $Z_{th}$ . Коли всі теплоємності заряджені, енергія втрат має бути виділена в навколишнє середовище. У цей момент імпеданс  $Z_{th}$  досягне статичного значення  $R_{th}$ , визначеного в специфікації (рис. 8).

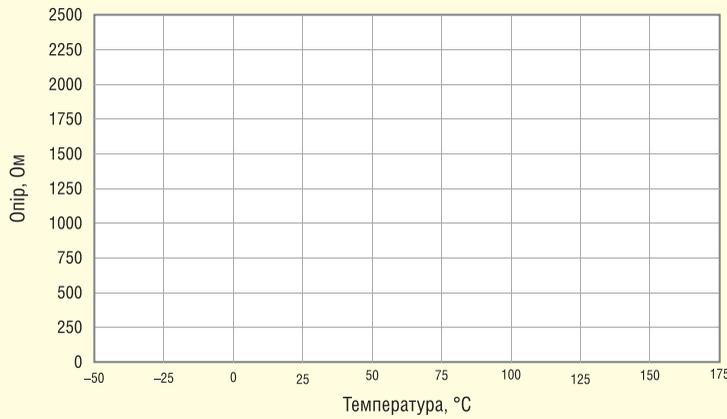
Перехідні теплові характеристики модулів SEMIKRON вимірюються в процесі їх проектування. На основі цих вимірювань створюють математичну модель Фостера (Foster model), що описується таким рівнянням:

$$Z_{th}(t) = R_1 \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right) + R_2 \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_2}} \right) + R_3 \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_3}} \right)$$

Значення елементів моделі Фостера для конкретних модулів доступні за запитом.

## Вбудований датчик температури

Модулі MiniSKiIP мають у своєму складі датчик температури з NTC- або PTC-характеристикою, конкретні дані вказані в технічній специфікації. Сенсор зазвичай розміщується на краю DCB-підкладки поблизу чипа IGBT, що пов'язано з вимогами ізоляції, з одного боку, і обмеженим простором, з іншого. Тепловий зв'язок у цьому випадку недостатньо ефективний для контролю нагріву кристалів, тому датчик використовується як індикатор температури теплостоку. Рекомендований поріг вимкнення силових транзисторів становить приблизно  $+115^\circ\text{C}$  у разі використання стандартних радіаторів повітряного охолодження. Температуру датчика в найгірших умовах експлуатації можна визначити шляхом моделювання методом кінцевих елементів з урахуванням системи охолодження. Зазначимо, що в разі використання рідинного охолодження тепловий зв'язок сенсора і чипів ще менший.

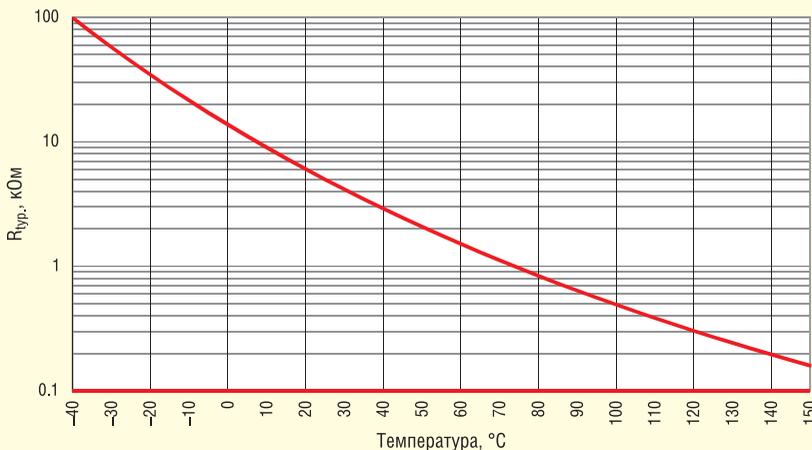


**Рис. 9. Залежність опору датчика SKCS2 Temp 100 від температури**

**Таблиця 4. Вираз для розрахунку температури та параметри PTC-датчика**

$$R_T = 1000 \text{ Ом} \times [1 + A(T - 25^\circ\text{C}) + B(T - 25^\circ\text{C})^2]$$

Символ	Допуск	Мінімальний	Типовий	Максимальний	Одиниці вимірювання
R <sub>25</sub>	±3%	970	1000	1030	Ом
R <sub>100</sub>	±2%	1637	1670	1703	
A			7.635 × 10 <sup>-3</sup>		1/°C
B			1.735 × 10 <sup>-5</sup>		1/°C <sup>2</sup>



**Рис. 10. Залежність опору датчика KG3B-35-5 від температури**

**Таблиця 5. Вираз для розрахунку температури та параметри NTC-датчика**

$$R_2 = R_1 \times e^{\left[ B_{NTC} \left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \right]}$$

R<sub>2</sub> — опір за абсолютної температури T<sub>2</sub>, К  
R<sub>1</sub> — опір за абсолютної температури T<sub>1</sub>, К

Символ	Допуск	Мінімальний	Типовий	Максимальний	Одиниці вимірювання
R <sub>25</sub>	±5%	4.75	5.0	5.25	кОм
R <sub>100</sub>		468	493	518	Ом
B <sub>(25/50)</sub>			3375		К
B <sub>(25/85)</sub>			3420		
B <sub>(100/125)</sub>					

Характеристику PTC-датчика SKCS2 Temp 100 наведено на рисунку 9, а його параметри та вираз для розрахунку опору — у таблиці 4.

Номинальний опір PTC-сенсора — 1 кОм ±3% за +25 °C (±2% за +10 °C),

типовий ТКС — 0.76 %/K, рекомендоване значення вимірювального струму 1–3 мА.

Номинальний опір NTC-сенсора KG3B-35-5 — 25 кОм ±5% за +25 °C (±2% за +100 °C), типовий ТКС —

0.76 %/K, рекомендоване значення вимірювального струму 1–3 мА. Характеристична крива наведена на рисунку 10, параметри і вираз для розрахунку опору — у таблиці 5.

**ЕЛЕКТРИЧНА ІЗОЛЯЦІЯ**

Як було зазначено, датчик температури MiniSKiiP встановлений поруч із чипами IGBT і FWD на одній і тій самій ізолювальній підкладці (рис. 11), що забезпечує так звану функціональну ізоляцію між сенсором та іншими колами, якщо інше не зазначено в технічному описі. Параметри ізоляції тестують у процесі виробництва.

Електричне перевантаження, спричинене коротким замиканням, здатне призвести до оплавлення чипа і розриву його з'єднувальних проводів, що призведе до виникнення високоенергетичного плазмового розряду та електричної дуги (рис. 12). Шлях поширення плазми непередбачуваний — дуга може досягти термодатчика, який опиниться під високою напругою. Рівень безпечного захисту відповідно до EN 61800-5-1 досягається за допомогою різних додаткових заходів, детально описаних у стандарті.

Пластикова притискна кришка MiniSKiiP має металеву вставку, з нею електрично з'єднується гвинт, що фіксує модуль на радіаторі. Оскільки ці елементи опиняються під однаковим електричним потенціалом, необхідно враховувати шляхи струмів витоку та ізоляційні зазори.

Відстань між металевою вставкою і друкованою платою (1 на рис. 13) становить понад 8.6 мм для стандартної кришки і 5.8 мм для тонкої кришки (рис. 14). Внутрішня відстань між гвинтом і платою (2 на рис. 13) перевищує 6.1 мм за товщини PCB 1 мм, як показано на рисунку 15. Якщо друкована плата товща за 1 мм, то зазор відповідно зменшується (наприклад, для PCB = 1.5 мм довжина витоку становитиме 6.1 – 0.5 = 5.6 мм).

Модулі MiniSKiiP заливаються силіконовим гелем із діелектричною міцністю 23 кВ/мм, який забезпечує електричну ізоляцію від DBC підкладки до радіатора (3 на рис. 13), а також від підкладки до кріпильного гвинта (4 на рис. 13).

**Порівняльний трекінг-індекс (СТІ)**

Параметр СТІ характеризує здатність матеріалу ізолятора перешкодити трекінгу — виникненню струмопродівних шляхів витоку поверхнею корпусу ізолятора в умовах забруднення.

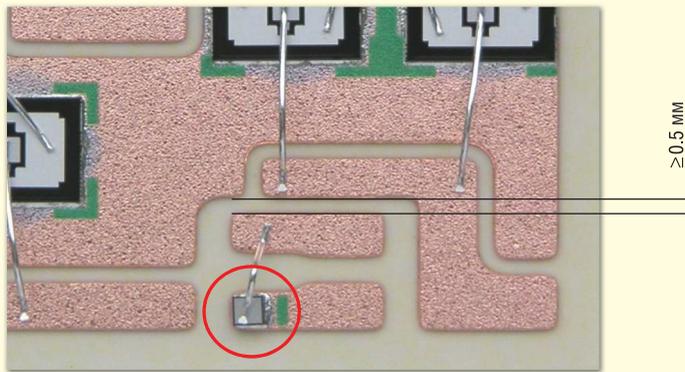


Рис. 11. Положення термодатчика на DBC-підкладці



Рис. 12. Високоенергетичний плазмовий розряд, спричинений плавленням проводового виводу чипа

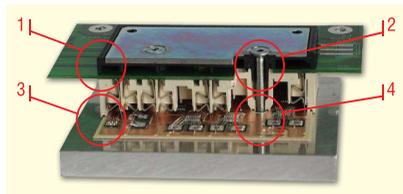


Рис. 13. Поперечний переріз складання «PCB—MiniSKiiP—радіатор», зони визначення шляхів струмів витоку

Типорозмір MiniSKiiP 1-3: ізоляційний матеріал, група I (СТІ  $\geq 600$ ).

Типорозмір MiniSKiiP 0: ізоляційний матеріал, група IIIa (400 > СТІ  $\geq 175$ ).

Стандартна кришка 0-3: ізоляційний матеріал, група IIIa (400 > СТІ  $\geq 175$ ).

Тонка кришка 0-3: ізоляційний матеріал, група IIIa (400 > СТІ  $\geq 175$ ).

## ТЕПЛОВІ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАТЕРІАЛІВ

Для теплового моделювання необхідно знати властивості матеріалів, що використовуються під час виготовлення MiniSKiiP, — товщину шарів, питому теплоємність і провідність. Структура силового модуля показана на рисунку 16, характеристики матеріалів наведено в таблиці 6. Особливо сильно від температури залежить теплопровідність кремнію, вона знижується приблизно на 0.5 Вт/(м·К) на 1 К приблизно до 100 Вт/(м·К) за +125 °С.

## ВИСНОВОК

Застосування пружинних контактів для під'єднання виводів керування та силових кіл, а також проста, економічна конструкція, яка не потребує паяння та дає змогу збирати модуль, інтерфейсну плату й тепловідвід за допомогою одного гвинта, — такі основні переваги сімейства модулів MiniSKiiP.

Можливість з'єднання всіх електричних кіл MiniSKiiP за одну технологічну операцію дає змогу скоротити витрати на розробку і виробництво порівняно з традиційними конструкціями приблизно на 15%. Використання пружинних контактів робить процес складання (збирання, збірки) простим і гнучким: замість наскрізних отворів на друкованій платі (PCB) потрібні тільки контактні майданчики. Важливо відзначити, що PCB виконує також функцію ланки постійного струму, оскільки розводка кіл живлення проводиться друкованими лініями. Притисний спосіб з'єднання і-

>8.6 мм стандартна кришка  
>5.8 мм тонка кришка

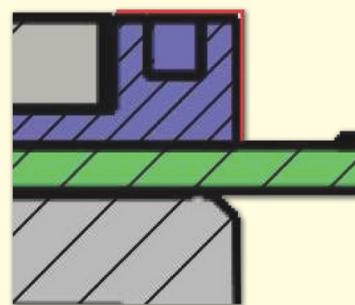


Рис. 14. Поперечний переріз зі шляхами струмів витоку від «тонкої» притисної кришки до PCB

>6.1 мм стандартна та тонка кришка



Рис. 15. Поперечний переріз зі шляхами струмів витоку від кріпильного гвинта до PCB

тотно підвищує надійність роботи модулів в умовах теплових і механічних впливів, що зробило компоненти сімейства MiniSKiiP промисловим стандартом для виробництва приводів потужністю до 40 кВт [1].

Зазвичай для виготовлення силових перетворювачів у діапазоні потужнос-

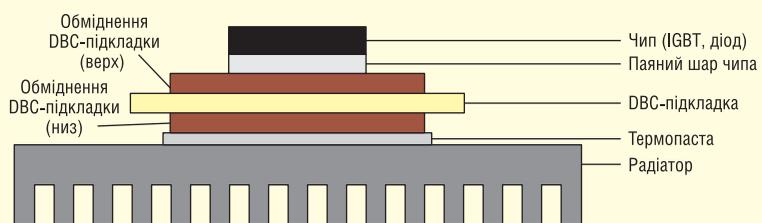


Рис. 16. Конструктивні шари збірки силового модуля

Таблиця 6. Характеристики матеріалів для теплового моделювання

Шар	Матеріал	Товщина, мкм	Питома теплопровідність @25 °С, Вт/(м·К)	Питома теплоємність @25 °С, Дж/(кг·К)	Густина @25 °С, кг/м <sup>3</sup>
1200-В IGBT T7	Si	112	148	700–750	2330
1200-В діод CAL4F		261			
1600-В діод PEP		310			
Паяний шар чипа	SnAg	≈ 100	57	214	7800
Обміднення DBC	Cu	300	394	385	8960
DBC-кераміка	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	380	24	830	3780
TiM		20–40	1–2.5	700	2500

ті 40–90 кВт застосовують стандартні модулі 34 і 62 мм із базовою платою і гвинтовими терміналами. Безбазові компоненти сімейства MiniSKiiP, що мають найпростіший притисковий спосіб підключення, стають хорошою альтернативою стандартним IGBT. Лінійка модулів MiniSKiiP також доповнилася напівмостовими ключами MiniSKiiP Dual (конфігурація GB) на струми 150–300 А (650 В), 150–300 А (1200 В) і 100–200 А (1700 В), які можна використовувати для розробки перетворювачів потужністю до 90 кВт. У них реалізовано нову конструктивну концепцію, що забезпечує їх максимально просте включення до складу трифазної схеми. При використанні цих компонентів одночасно вирішуються обидва поставлені завдання — зниження вартості комплектуючих і зменшення виробничих витрат.

**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**

Література:

1. *Technical Explanation. MiniSKiiP Gen. II. SEMIKRON INTERNATIONAL, GmbH, 2021.*
2. Демут Фолькер. *MiniSKiiP Dual — альтернатива IGBT 62 мм // Силовая электроника. 2014. № 3.*
3. AN1404 «*Thermal resistance of IGBT Modules — specification and modeling*». SEMIKRON INTERNATIONAL, GmbH, 2014.
4. Langenbucher A. *Taking Power density to a New Level // Bodo's Power Systems. 2011. September.*
5. Giessmann A., Langenbucher A. *A Look into the Future: Savings Potential in Inverter Design // Bodo's Power Systems. 2011. December.*
6. Scheuermann U., Beckedahl P. *The Road to the Next Generation Power Module — 100% Solder Free Design. Proc. CIPS 2008. Nuremberg, 2008.*
7. Колпаков А. *Надежность прижимных соединений силовых модулей в условиях агрессивных сред // Силовая электроника. 2006. № 4.*
8. [www.semikron-danfoss.com](http://www.semikron-danfoss.com)

CN

## НВП "ТЕХНОСЕРВІСПРИВІД"

Офіційний представник Semikron Danfoss в Україні

[www.tsdrive.com.ua](http://www.tsdrive.com.ua)



*Діодні, тиристорні та діодно-тиристорні модулі SEMİKRON від офіційного представника в Україні*



03057, Київ-57, пр-т Берестейський, 56, оф. 335,  
тел./факс: (044) 458 47 66  
E-mail: [sp.tsdrive@gmail.com](mailto:sp.tsdrive@gmail.com)  
[www.tsdrive.com.ua](http://www.tsdrive.com.ua)