

# Силова електроніка для джерел живлення

Переклад та редагування: Володимир Павловський, к.т.н, с.н.с.,  
Інститут електродинаміки (ІЕД) НАН України

**Компанія Semikron Danfoss є світовим технологічним лідером у галузі силової електроніки. Асортимент її продукції містить напівпровідникові прилади, силові модулі, стеки та системи. У світі, який стає все більш електричним, технології Semikron Danfoss є більш актуальними, ніж будь-коли. Завдяки інноваційним рішенням для автотранспортних, промислових і поновлюваних джерел енергії компанія Semikron Danfoss допомагає світу використовувати енергію більш ефективно і раціонально, а отже, значно скоротити загальні викиди CO<sub>2</sub>, що є одним з найбільших викликів сьогодення.**

**В цій статті мова піде про рішення компанія Semikron Danfoss з розділу силової електроніки для джерел живлення.**

- загального застосування;
- зварювання та різання;
- індукційного нагріву;
- медичне обладнання.

Розглянемо детальніше основну продукцію компанії Semikron Danfoss.

## НАПІВМОСТИ НА ВЕЛИКІ СТРУМИ В СТАНДАРТНОМУ КОНСТРУКТИВІ

Від інженерних випробувальних лабораторій до лікарняних центрів з візуалізацією інформації модуль SEMITRANS Classic (рис. 2) є «робочою конячкою» галузевого стандарту для джерел електроживлення.

Модуль SEMITRANS 3, завдяки інтеграції новітнього IGBT M7, має тепер

Категорія джерел живлення охоплює широкий спектр перетворювачів електроенергії, які використовуються в лабораторних, медичних і промислових умовах. Вони мають спільну рису — регульовану вихідну напругу або струм, задані користувачем. Разом з тим електричні характеристики джерел живлення можуть значно відрізнятися в залежності від кінцевого застосування. Медичні системи з візуалізацією, такі як сканери комп'ютерної томографії (КТ), вимагають генерування високої напруги за допомогою низьковольтних напівпровідникових перетворювачів і підвищувального трансформатора. Подібним чином працюють і зварювальні системи, але з протилежним результатом: великі струми при низькій напрузі. В обох випадках спільною рисою є високі частоти перемикання та передові резонансні топології.

Джерела живлення, як чистий перетворювач енергії, можуть поєднуватися з системними контролерами вищого рівня для моделювання сонячних панелей або батарей. Різноманітність конструктивних виконань, від кишенькових пристроїв до корпусів для монтажу в стійку або корпусів розміром з шафу, вимагає цілої низки модулів живлення в надійних корпусах. Використання високих частот і відповідних магнітних матеріалів означає, що джерела живлення також будуть мати переваги від застосування карбиду кремнію.

Силові модулі компанії Semikron Danfoss для джерел живлення залежно від сфери використання умовно можна поділити на чотири групи (рис. 1):

	<p><b>ЗАГАЛЬНОГО ЗАСТОСУВАННЯ</b></p> <p><b>10 кВА–250 кВА</b></p> <p><b>Сфери використання:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– тестове обладнання</li> <li>– сонячні батареї і акумулятори</li> <li>– модульні джерела живлення</li> </ul> <p><b>Особливості:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– типові конструктивні блоки</li> <li>– надійна конструкція</li> </ul> <p><b>Номенклатура продукції:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– SEMITOP E</li> <li>– SEMIX 3 Press-Fit</li> <li>– SEMITRANS Classic</li> <li>– SEMIPACK</li> <li>– Drivers</li> <li>– дискретні модулі</li> </ul>	<p><b>ЗВАРЮВАННЯ ТА РІЗАННЯ</b></p> <p><b>5 кВА–500 кВА</b></p> <p><b>Сфери використання:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– апаратура точкового та дугового зварювання</li> <li>– плазмові пальники</li> </ul> <p><b>Особливості:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– високі вихідні струми</li> <li>– імпульсна робота</li> </ul> <p><b>Номенклатура продукції:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– SEMITOP E</li> <li>– SEMIX 3 Press-Fit</li> <li>– SEMITRANS Classic</li> <li>– SEMITRANS 10</li> <li>– SEMIPACK</li> <li>– дискретні модулі</li> </ul>	
	<p><b>ІНДУКЦІЙНИЙ НАГРІВ</b></p> <p><b>10 кВА–1 МВА</b></p> <p><b>Сфери використання:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– гартування інструменту та деталей</li> <li>– промислові печі</li> </ul> <p><b>Особливості:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– резонансні методи перетворення</li> <li>– кілька діапазонів робочих частот</li> </ul> <p><b>Номенклатура продукції:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– SEMITOP E</li> <li>– SEMITRANS Classic</li> <li>– SEMITRANS 10</li> <li>– SEMITRANS 20</li> <li>– SEMIPACK</li> <li>– SKiIP 4/7 IPM</li> <li>– дискретні модулі</li> </ul>	<p><b>МЕДИЧНЕ ОБЛАДНАННЯ</b></p> <p><b>1 кВА–100 кВА</b></p> <p><b>Сфери використання:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– високовольтні джерела електроживлення</li> <li>– генератори рентгенівського випромінювання</li> <li>– системи візуалізації інформації</li> </ul> <p><b>Особливості:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– системи високої надійності</li> <li>– високі тактові частоти</li> <li>– компактні конструкції</li> </ul> <p><b>Номенклатура продукції:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– SEMITOP E</li> <li>– SEMITRANS Classic</li> <li>– SEMIPACK</li> </ul>	

Рис. 1. Силові модулі компанії Semikron Danfoss для джерел живлення



**Рис. 2. Модуль SEMITRANS® Classic**  
(від 100 до 600 кВА)

максимальний робочий струм 800 А. Це дає розробникам більше свободи у визначенні розмірів блоків, прийнятих для масштабованої архітектури джерел живлення, наприклад для сонячної енергетики.

Якщо потрібна робота на вищих частотах, модулі SEMITRANS можуть постачатися з високошвидкісним IGBT 4 (12F4). У поєднанні з діодами Semikron Danfoss Ultrafast CAL 4U ці IGBT забезпечують максимальну температуру переходу 175 °C і високу густину струму. Серія 12F4 може замінити IGBT 125 старого типу (супершвидкісні NPT) у багатьох застосуваннях і є дуже хорошим вибором для нових високочастотних конструкцій.

Для забезпечення найвищої швидкості та ефективності також доступні МОН польові транзистори з карбїду кремнію з робочим струмом 500 А ( $R_{DS(on)} = 3.8 \text{ мОм}$ ).

Маючи багаторічний досвід виробництва модулів у конструктиві 62мм,



**Рис. 3. Модуль SEMITRANS® 20**  
(від 500 кВА до 2 МВА)

фірма Semikron Danfoss продовжує оптимізувати цю платформу та забезпечувати високу якість виробництва.

*Основні властивості:*

- розширений діапазон струму з IGBT 7-го покоління;



#### SEMIPACK®

Від 800 до 2200 В

##### Біполярні модулі від лідера ринку

6 розмірів корпусу SEMIPACK від 1 до 6

Від 800 до 2200 В: від 20 до 1360 А

Діоди та тиристорні чипи Semikron Danfoss

Діоди, тиристори в некерованій, напів- та повнокерованій топології

Високонадійні притискові контакти або економічно ефективні модулі з дротовим обжимом

Поставляються з діодами на частоту електромережі або з високошвидкісними діодами



#### SEMITOR® E

Від 5 до 300 кВА

##### Перевищення стандарту для досягнення екстрапродуктивності

Стандартний корпус двох типорозмірів без базової пластини

Запресовані з'єднання на основі друкованої плати

650 В/1200 В IGBT: від 10 до 200 А

1200 В SiC: від 30 до 250 А

Шестикорпусна, напівмостова, понижуюча/підвищуюча/симетрична топологія і 3-рівнева топологія NPC/TNPC

Оптимізований монтаж та попередньо нанесений TIM забезпечують найнижчий термічний опір у своєму класі



#### SEMIX® Press-Fit

Від 100 до 400 кВА

##### Перевищення стандарту для досягнення екстрапродуктивності

Стандартна конструкція з запресовкою і корпусом висотою 17 мм

650 В/1200 В/1700 В IGBT: від 225 до 900 А

1200 В Hybrid SiC: 600 А

Напівмостовий, розділений NPC і топології понижування/підсилення

Збірка драйвера

Поставляється з вбудованим шунтуючим резистором



#### SEMIPACK® Classic

Від 100 до 600 кВА

##### Перевірений конструктив для силової електроніки

Надійний стандартний конструктив у шести розмірах корпусів

600 В/650 В/1200 В/1700 В IGBT: від 50 до 900 А; 1200 В Hybrid and Full SiC: від 125 до 500 А

Напівмостова одноключова топологія і топології понижування/підсилення, готові до топології TNPC/NPC/ANPC

Деякі IGBT, включаючи IGBT M7

Топологія повної потужності TNPC завдяки напівмосту та ключу змінного струму (загальний вмітер) із покращеними показниками діода зворотного ходу



#### SEMIPACK® 10

Від 500 кВА до 2 МВА

##### Надійний модуль високої потужності

Розроблений конструктив модулів високої потужності 1200 В/1700 В IGBT: від 450 до 1800 А

Топології: напівмостова, понижуюча/підвищуюча, TNPC, NPC та розділена топологія NPC

Повноцінне багатоканальне джерело живлення завдяки альтернативному 1700 В чипу та IGBT M7



#### SEMIPACK® 20

Від 500 кВА до 2 МВА

##### Новий стандарт у галузі високої потужності

Новітній силовий модуль промислового стандарту для застосувань з великою потужністю

1200В/1700В IGBT: від 900А до 1400А  
2000В SiC: 1700 А/1 мОм

Напівмостова топологія

Мала індуктивність розсіювання, конструктив з високою густиною потужності

Підвищена надійність завдяки новітній технології компоновки модулів

**Рис. 4. Силові модулі компанії Semikron Danfoss для джерел живлення**

- добре перевірений конструктив SEMITRANS Classic;
- призначений для блоків середньої та великої потужності до 600 кВА;
- доступні набори високошвидкісних чипів на велику потужність.

## НОВИЙ БЛОК ДЛЯ ПОТУЖНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

Перетворювачі потужності в мегаватному діапазоні зазвичай складаються з блоків потужністю в сотні кіловат, а також шляхом паралельного з'єднання силових модулів. На таких високих струмах критично важлива низька індуктивність монтажу зі збалансованою поведінкою перемикання модулів. Модуль SEMITRANS 20 (рис. 3) відповідає цій вимозі у новому оформленні згідно з промисловим стандартом.

Цей модуль сумісний з серією силових струмових Si IGBT на 1 200 і 1 700 В. Він є ідеальною «щеглинкою» для побудови потужних 2- і 3-рівневих перетворювачів наступного покоління.

Для найновішої серії 2-рівневих перетворювачів на 1 500 В постійного струму модуль SEMITRANS 20 тепер оснащений SiC MOSFET на 2 кВ. Це забезпечує простоту та високу ефективність існуючих застосувань і відкриває двері для нових.

### Основні властивості:

- новий стандартний конструктив для різноманітного використання;
- паразитна індуктивність монтажу не перевищує 10 нГн;
- просте підключення ланки постійного струму;
- симетрична структура забезпечує рівномірний розподіл струму в багатомодульному паралельному з'єднанні;
- конструктив високої надійності.

## МОДУЛІ ВИПРЯМЛЯЧІВ ТА МОДУЛІ IGBT

Номенклатуру модулів IGBT та випрямлячів, а також їхні особливості та сфери застосування наведено на рисунку 4.

## НАЙПОТУЖНІШИЙ IPM НА РИНКУ

Лінійка продуктів SKiiP IPM встановлює еталон для високопродуктивних і надійних конструкцій інверторів. Модулі SKiiP 4 (рис. 5) і SKiiP 7 (рис. 6) мають



Рис. 5. Модуль SKiiP 4 (до 2 МВт, доступні з SiC MOSFET)

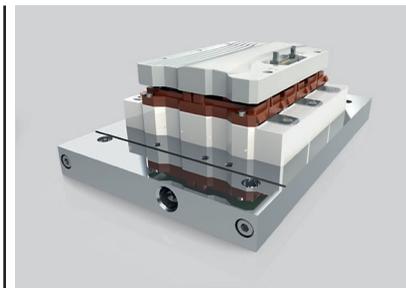


Рис. 6. Модуль SKiiP 7 (від 150 кВТ до 2.4 МВт)

високу густину потужності в поєднанні зі спеціальними радіаторами і гнучкими варіантами охолодження, такими як повітряне або водяне охолодження. Надійна технологія драйвера, вбудовані датчики струму та комплексні функції захисту завершують конструкцію IPM.

Модуль SKiiP 7 отримав широке поширення в сегменті промислових електроприводів. Завдяки своїй шестипакетній або напівмостовій топології він охоплює діапазон струму від 500 до 2 400 А.

Модуль SKiiP 4 який доступний у напівмостовій топології, був оптимізований для найвищих вимог щодо циклічного відбору потужності та охоплює вищий діапазон потужності до 3 600 А.

Щоб забезпечити найвищу надійність і термін служби, електромонтаж силових кіл на 100% не містить паяних з'єднань. Технологія спікання для кріплення чипів до підкладки у кожному модулі замінює шар припою, який зазвичай спричиняє обмеження терміну служби модуля. Отже, спікання покращує потужність модуля і його термоциклічні можливості.

Інтегрований драйвер затвору у модулі SKiiP 4 встановив нові стандарти з точки зору надійності та розширеної функціональності завдяки його інтерфейсу CAN. Цифровий драйвер гарантує надійну ізоляцію між первинною та вторинною сторонами як для сигналів перемикання, так і для вимірювання параметрів. Інтерфейс CAN дозволяє налаштувати параметри конфігурації модуля SKiiP 4 і зчитувати параметри його установок.

### Основні властивості:

- напівмости і шестимодульна конструкція;
- 1 200 В/1 700 В IGBT: від 500 до 3 600 А; 2 000 В SiC: від 1 200 до 2 400 А;
- гнучкі варіанти охолодження: повітряне, водяне або індивідуальні варіанти охолодження;
- паралельна робота для збільшення вихідної потужності.

## ПЛАТФОРМИ СИЛОВИХ ЕЛЕКТРОННИХ СТЕКІВ ДЛЯ СЕРТИФІКОВАНИХ ІНВЕРТОРНИХ ЗБІРОК, ПРИСТАСОВАНИХ ДО КОНКРЕТНИХ ПОТРЕБ

### Стандартні набори

Всі набори Power Electronic Stacks дозволяють клієнтам Semikron Danfoss досягати успіху на динамічних ринках і вирішувати будь-які глобальні виклики. Компанія поставляє набори, які містять випрямлячі, IGBT і SiC для напруг змінного струму від 380 до 690 В. Стандартні набори охоплюють діапазон вихідного струму від 200 до 4 000 А:

- набори IGBT з водяним охолодженням (рис. 7):
  - SEMIKUBE;
  - SKiiPRACK;
- набори IGBT з повітряним охолодженням (рис. 8):
  - SEMIKUBE;
  - SEMIKUBE SlimLine;
- набори діодів/тиристорів:
  - SEMISTACK CLASSIC B6U/B6C/W3C.

### Індивідуальні набори

Окрім стандартних наборів, Semikron Danfoss має величезний досвід у розробці індивідуальних рішень для клієнтів. Кваліфіковані інженери доступні до контактів в stack-центрах компанії по всьому світу, щоб запропонувати конкретні рішення шляхом адаптації існуючих платформ або розробки індивідуальних перетворювачів.

Співпраця з компанією Semikron Danfoss надає клієнтам чотири ключові переваги для їхнього успіху:

- найкоротший час виходу на ринок;
- економія витрат на дослідження та розробки, виробництво та випробування;
- глобальний характер виробництва наборів Semikron Danfoss;
- команда інженерів з величезним досвідом роботи.



**Рис. 7. Стандартний мостовий перетворювач з водяним охолодженням (2 200 А)**



**Рис. 8. Чотирифазний перетворювач з індивідуальним повітряним охолодженням (2 00А)**

**ДРАЙВЕРИ IGBT**

Унікальний портфель продуктів компанії Semikron Danfoss забезпечує застосування у всіх відомих галузях промисловості за допомогою універсального рішення, яке поєднує най-

сучасніші силові модулі та електроніку драйверів.

Драйвери IGBT Semikron Danfoss доступні у вигляді двоканальних драйверів, які підходять для будь-якого стандартного напівпровідникового модуля живлення, або як рішення Plug-and-Play, які ідеально підходять для модулів SEMiX 3 Press-Fit, SEMITRANS 10 і сумісних з ними модулів (рис. 9).

**Економічна ефективність**

За допомогою драйверів Semikron Danfoss, використовуючи технологію високої інтеграції ASIC, можна досягти виняткової компактності системи та створити компактні та економічно ефективні конструкції інверторів.

Ізольовані сигнали датчика температури та напруги ланцюга постійного струму на інтерфейсі драйвера, і блокування від перенапруги та перегріву також допомагають значно знизити витрати на систему.

**Економія часу**

Понад 25 років досвіду в розробці інноваційної електроніки драйвера IGBT дозволяє компанії Semikron Danfoss швидко знайти рішення майже для будь-якої проблеми, пов'язаної з електронікою драйвера. Драйвери Plug-and-Play напряму підключаються до більшості стандартних модулів IGBT. Ядра драйвера IGBT підходять до адаптерних або основних друкованих плат. Для останнього випадку фірма Semikron Danfoss надає всі виробничі дані, щоб скоротити час розробки та прискорити час виходу на ринок.

**Надійність**

Драйвери SKYPER — це добре відомі стійкі та надійні драйвери IGBT, що працюють у складних умовах на-

вколишнього середовища. Впродовж багатьох років експлуатації фірмова технологія драйвера IGBT невпинно вдосконалювалася. Ця технологія встановлює нові стандарти основних методів безпечного керування затвором, надійного захисту затвору та посиленої ізоляції.

**Компактна конструкція**

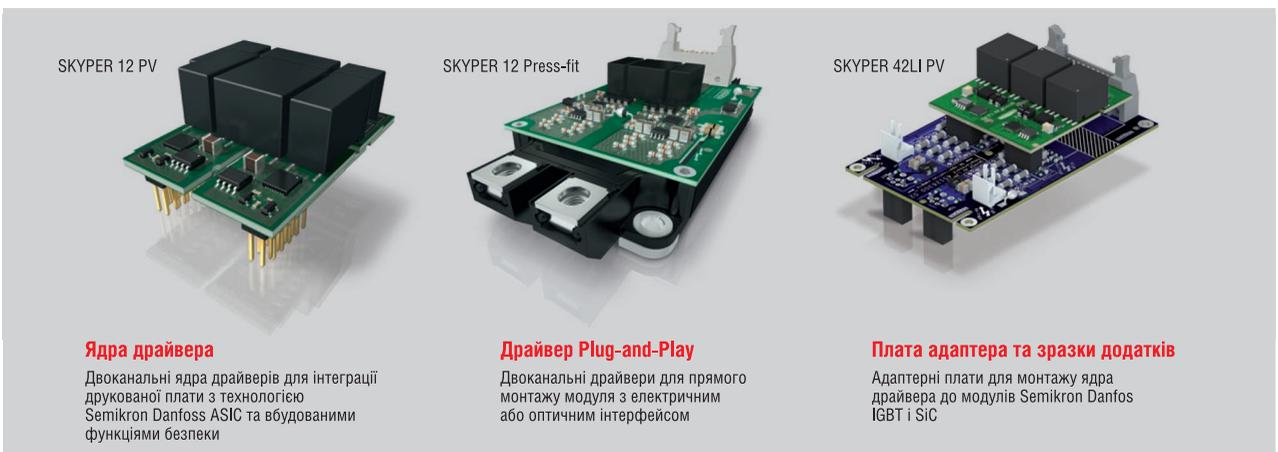
Технологія SKIC ASIC від Semikron Danfoss забезпечує дуже компактну конструкцію системи з мінімальною кількістю периферійних компонентів. Завдяки високоінтегрованій обробці сигналу та багатоканальному управлінню збогами ASIC Semikron Danfoss забезпечують надійне керування затвором.

*Основні властивості:*

- посилена ізоляція у колах передачі сигналу та електроенергії;
- двоканальний драйвер;
- стійкість до сплесків напруги з амплітудою до 1 700 В у мережі електроживлення;
- напруга до 1 500 В шини постійного струму;
- амплітуда струму від 8 до 35 А на один канал;
- пікова потужність від 1 до 4.2 Вт на один канал;
- підходить для багаторівневих топологій і IGBT 7-го покоління.

**ТЕРМОІНТЕРФЕЙСНІ МАТЕРІАЛИ**

Компанія Semikron Danfoss була першим виробником силових модулів на ринку, який запропонував силові модулі з попередньо нанесеним термоінтерфейсним матеріалом (англ. Thermal Interface Material, *TIM*). Зараз Semikron Danfoss має понад два десятиліття досвіду та понад 30 міль-



SKYPER 12 PV

**Ядра драйвера**

Двоканальні ядра драйверів для інтеграції друкованої плати з технологією Semikron Danfoss ASIC та вбудованими функціями безпеки

SKYPER 12 Press-fit

**Драйвер Plug-and-Play**

Двоканальні драйвери для прямого монтажу модуля з електричним або оптичним інтерфейсом

SKYPER 42LI PV

**Плата адаптера та зразки додатків**

Адаптерні плати для монтажу ядра драйвера до модулів Semikron Danfos IGBT і SiC

**Рис. 9. Драйвери IGBT**



**Рис. 10.** Технологічна лінія монтажу та нанесення термопасту модулів SEMITOP

йонів попередньо надрукованих (*pre-printed*) модулів у цій галузі.

Компанія розробляє шаблони друку для кожного типу модуля, щоб одержати найкращий розподіл ТІМ і його товщини, коли модуль встановлено на радіаторі. Ці візерунки друкуються на модулях у спеціально очищеному середовищі на автоматизованій лінії шовкографії та трафаретного друку (рис. 10). Для забезпечення рівномірності нанесення візерунків використовується статистичний контроль процесу (SPC). Спеціальне пакування гарантує, що ТІМ надійде на вашу виробничу лінію в бездоганному стані.

Компанія Semikron Danfoss пропонує термопасту або матеріал для зміни фазового стану залежно від вимог клієнта (наприклад, підвищення продуктивності, зменшення зусиль при тран-

спортуванні) і типу модуля (з базовою плитою або без неї). Надійному монтажу модулів без базової плити сприяє матеріал з низькою в'язкістю, такий як термопаста. Високоєфективна термопаста (НРТР) добре підходить для цього та завдяки оптимізованому вмісту наповнювача забезпечує найкращі в своєму класі теплові характеристики.

Крім того, для зручності використання під час складання більшість силових модулів також можуть поставлятися з попередньо нанесеним матеріалом для зміни фазового стану (PCM) (рис. 11, 12). Згадані вище матеріали мають тверду консистенцію при кімнатній температурі. При нагріванні модуля після першого увімкнення PCM переходить у стан текучості і заповнює проміжки та створює тепловий інтерфейс. Застосовуючи НР-

PCM, новий ексклюзивний високоефективний матеріал для зміни фазового стану від Semikron Danfoss, можна поєднати переваги фазозмінного матеріалу з ефективністю найкращої доступної пасту.

*Основні властивості:*

- специфічні для модуля моделі для оптимізованого розподілу ТІМ;
  - спрощена логістика та зниження витрат виробництва;
  - покращена міцність збірки;
  - збільшений термін служби, надійність.
- Номенклатура продукції:*
- НРТР: високоефективна термопаста;
  - НР-PCM: високоефективний матеріал для зміни фазового стану.

**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,  
+38 (067) 463-46-62,  
+38 (095) 284-96-62,  
e-mail: sp.tsdrive@gmail.com,  
semikron@ukr.net,  
service\_danfoss@ukr.net  
www.tsdrive.com.ua,  
www.semismart.com.ua

СН



**Рис. 11.** Модуль без базової плити з попередньо нанесеною термопастою



**Рис. 12.** Модуль з базовою плитою і попередньо нанесеним матеріалом для зміни фазового стану