

# Карбід-кремнієві компоненти компанії Microchip для промисловості, авіації та оборонної сфери

Джордж Уорд (George Ward), Microchip Technology Inc.

Переклад та редактування: Євген Тетерев, Віталій Шевченко, Rainbow Technologies,  
E-mail: svl@rainbow.com.ua

## СИЛОВІ МОДУЛІ

Силкові карбід-кремнієві модулі призначені для інтеграції декількох напівпровідникових приладів в єдиному міцному корпусі, що дозволяє працювати з більш високим рівнем потужності, ніж у дискретних елементів. На рисунку 7 представлений весь набір корпусів, що пропонується для силових модулів на клас напруги від 700 до 1700 В і струм від 50 до 850 А.

Корпуси D3 і D4, що показані в верхній частині рисунка, мають висоту 30 мм і

відносяться, переважно, до кремнієвих моделей попередніх розробок. Їх все частіше замінюють на нові низькопрофільні корпуси серії SPx висотою 12 або 17 мм. Ця серія корпусів має знижену індуктивність та оптимізовані паразитні параметри, що забезпечує більш ефективну та безпечну комутацію ключів на високих частотах, характерних для карбїду кремнію.

Лінійка стандартних карбід-кремнієвих силових модулів Microchip представлена на рисунку 8.

Діодні карбід-кремнієві модулі випускаються на клас напруги 700, 1200 і

1700 В та струм від 50 до 600 А. Пропонуються чотири топології: 2-діодна схема із загальним катодом (*Dual Common Cathode*), однофазний міст (*Full bridge*), фазове плече (*Phase leg*) та трифазний міст (*3 phase bridge*). Діодні модулі можна знайти на сайті Microchip [за цим посиланням](#).

Транзисторні карбід-кремнієві модулі випускаються на клас напруги 700, 1200 В, а з недавнього часу — також на 1700 В, номінальний струм знаходиться в межах від 44 до 754 А. Лінійка транзисторних модулів включає всі стандартні топології: Boost chopper, Buck chopper, Full bridge, Phase leg, Triple phase leg, Three phase bridge и Vienna phase leg. Їх можна знайти на сайті Microchip [за цим посиланням](#).

Останнім часом номенклатура транзисторних модулів доповнилася ще такими топологіями, як Dual Common Source (рис. 9a) і Three Level Inverter (рис. 9б). Ці вироби мають клас напруги 700–1700 В і струм від 44 до 812 А. Їх можна знайти на сайті Microchip [за цим посиланням](#).

Як зазначалося раніше, основною перевагою карбід-кремнієвих напівпровідників є можливість комутації струмів з високою частотою — значно вище, ніж дозволяють кремнієві силові ключі. На таких частотах важливо максимально знизити паразитні індуктивності,

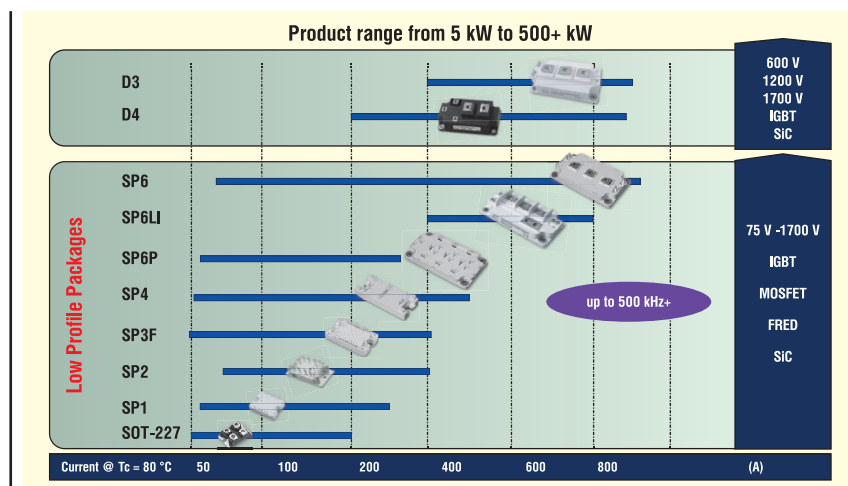


Рис. 7. Набір корпусів, що пропонується для силових модулів на клас напруги від 700 до 1700 В і струм від 50 до 850 А

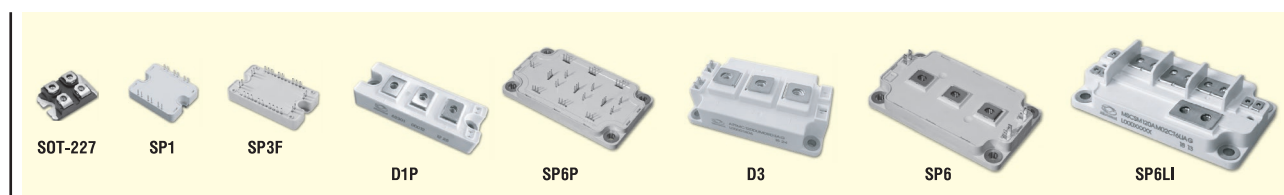
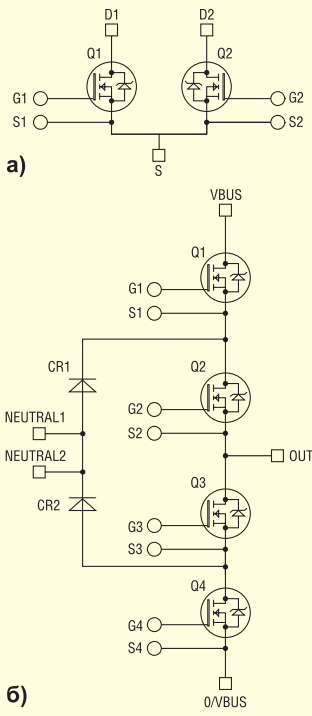


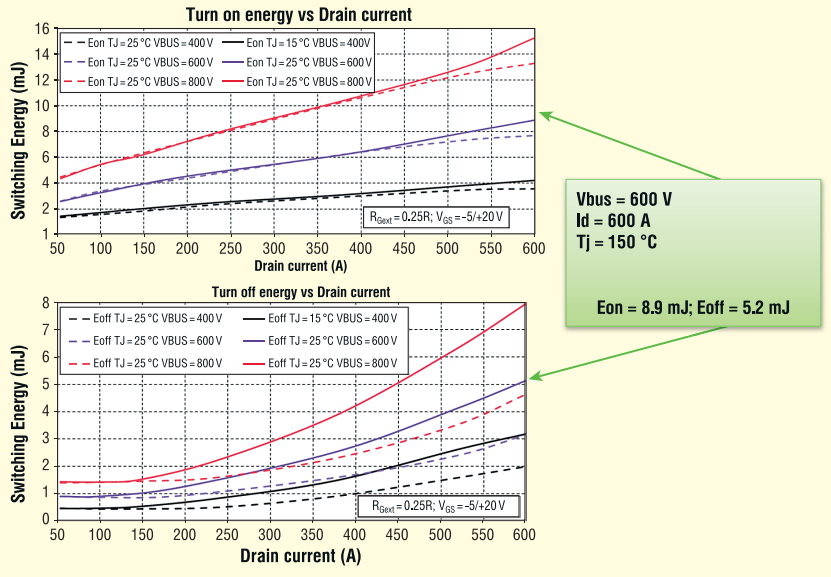
Рис. 8. Лінійка стандартних карбід-кремнієвих силових модулів Microchip



**Рис. 9.** Електричні схеми нових SiC-MOSFET модулів з подвійним загальним витоком (а) і 3-рівневою інверторною топологією (б)

**Таблиця 4.** Модулі SP6LI з дуже низькою індуктивністю

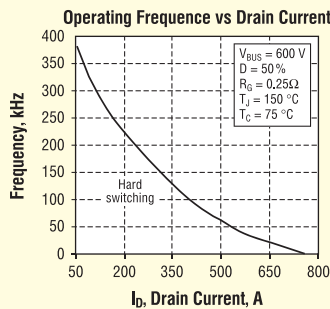
| № | Найменування         | V <sub>DSS</sub> (V <sub>R</sub> ), В | I <sub>D</sub> , А (80 °С) | R <sub>DS(on)</sub> , мОм (25 °С) |       | Зворотний діод – I <sub>r</sub> , А |
|---|----------------------|---------------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|-------|-------------------------------------|
|   |                      |                                       |                            | тип.                              | макс. |                                     |
| 1 | MSCSM70AM025CT6LIAG  | 700                                   | 538                        | 2.50                              | 3.20  | 300                                 |
| 2 | MSCSM120AM02CT6LIAG  | 1200                                  | 754                        | 2.10                              | 2.58  | 300                                 |
| 3 | MSCSM120AM03CT6LIAG  | 1200                                  | 641                        | 2.50                              | 3.10  | 250                                 |
| 4 | MSCSM120AM042CT6LIAG | 1200                                  | 394                        | 4.20                              | 5.20  | 180                                 |
| 5 | MSCSM170AM029CT6LIAG | 1700                                  | 538                        | 2.90                              | 3.75  | 300                                 |
| 6 | MSCSM170AM058CT6LIAG | 1700                                  | 281                        | 5.80                              | 7.50  | 180                                 |



**Рис. 10.** Динамічні характеристики модулів SP6LI

щоб скористатися всіма перевагами технології SiC. У цьому відношенні особливий інтерес представляють карбід-кремнієві MOSFET-модулі Microchip в корпусі SP6LI зі стандартним посадочним розміром 62 × 108 мм і топологією Phase leg (фазове плече). Завдяки симетричній конструкції та дуже коротким між'єднувальним зв'язкам їх паразитна індуктивність була знижена до рівня 2.9 нГн, що є рекордно малим показником. Як видно з таблиці 4, ці модулі мають дуже високі номінальні струми і виготовляються на всі класи напруги, в тому числі на 1700 В.

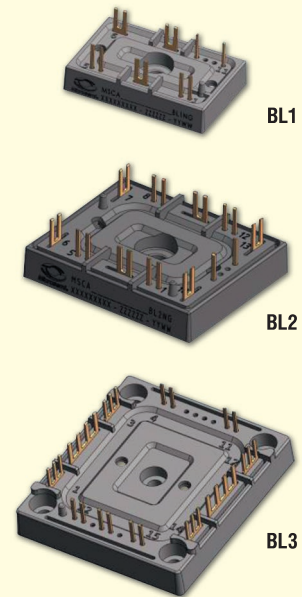
Можливості модулів SP6LI добре ілюструють графіки на рисунках 10 та 11. Як з них видно, стандартний модуль з параметрами 1700 В/2 мОм має енергію включення всього 8.9 мДж, а енергію відключення — 5.2 мДж. Виміри виконувались в умовах високої температури кристала (150 °С) і комутації досить великої потужності: струм становив 600 А, а напруга — 600 В. Швидкісні характеристики цього виробу також вражають — модуль здатний комутувати струм 540 А з частотою 50 кГц, 400 А з частотою 100 кГц та 230 А з частотою 200 кГц (рис. 12). Такі показники поки що є недостижними не тільки для IGBT-модулів, але й для багатьох карбід-кремнієвих



**Рис. 11.** Швидкісні характеристики модулів SP6LI

продуктів, оскільки не всі з них мають індуктивність порівняну з SP6LI.

Остання категорія модулів відноситься до **полегшеної серії**, оскільки такі модулі не мають базової плати. Завдяки цьому вони важать на 40–50% менше, ніж промислові аналоги, а їх вертикальні габарити не перевищують 10 мм. Вони будуть особливо цікаві фахівцям з галузі авіації, у тому числі розробникам БПЛА, оскільки мають розширений температурний діапазон (від –55 °С) та відповідають вимогам авіаційного стандарту DO-160.



**Рис. 12.** Корпуси модулів полегшеної серії без базової плати

На даний момент модулі пропонуються у корпусах BL1 (13.5 г), BL2 (21.5 г) та BL3 (32.5 г) (рис. 12). Будь-яка бортова енергосистема літального апарату може бути побудована з комбінації цих трьох корпусів. Полегшена серія про-

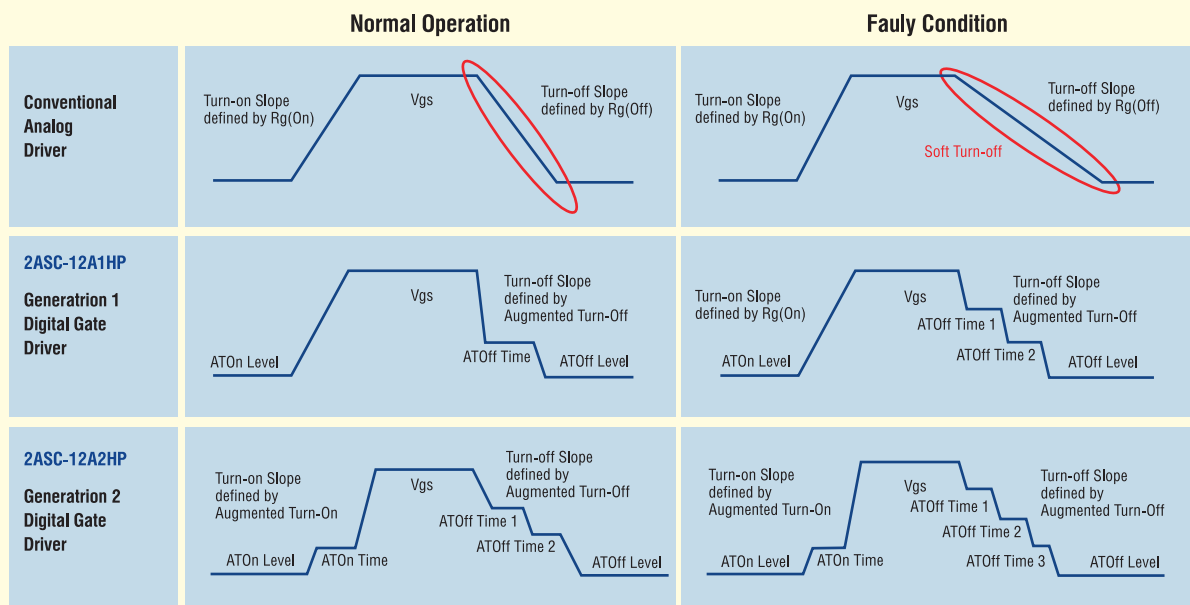


Рис. 13. Особливості роботи цифрових драйверів на основі технології Augmented

понується як у варіанті SiC MOSFET, так і у вигляді IGBT або діодних модулів. Всі ці продукти можна знайти на сайті Microchip [за цим посиланням](#).

## ЦИФРОВІ ДРАЙВЕРИ, ЩО ПРОГРАМУЮТЬСЯ

Дотримуючись свого системного підходу, компанія Microchip пропонує для розглянутих вище силових модулів спеціально розроблені драйвери. Оскільки карбід-кремнієві ключі працюють на досить високих частотах, для них характерні такі явища, як підвищений перегрів, часті перенапруги, високий рівень шумів і схильність до коротких замикань. Традиційні аналогові драй-

вери мають недостатню швидкодію та чутливість для ефективно нейтралізації цих ефектів, тому для карбід-кремнієвих ключів була розроблена спеціальна серія цифрових драйверів на основі технології Augmented.

Особливості роботи цих драйверів показані на відповідних часових діаграмах (рис. 13). Тут представлені графіки включення та відключення карбід-кремнієвих транзисторів у нормальному та аварійному режимах. Верхня діаграма відноситься до аналогових драйверів. З неї видно, що включення та відключення транзистора, в тому числі і в аварійному режимі, виконується за один крок, при цьому швидкість відключення регулюватися не може і залежить тільки від опору транзисторного затвора. Нижня та

редня діаграми відносяться до драйверів Augmented Switching першого та другого покоління. З них видно, що включення транзистора може здійснюватися у два етапи, а відключення — у 3 або 4 етапи, при цьому швидкість відключення задається програмно і може бути відносно швидко підібрана дослідним шляхом. Такий підхід забезпечує швидке, надійне та плавне керування транзистором, яке знижує навантаження на пристрій та подовжує термін його служби.

Номенклатура драйверів Augmented Switching представлена на рисунку 14. Вона складається з самих драйверів (*Gate Driver Cores*), адаптерних плат під різні силові модулі (*Module Adapter Boards*) та рішення Plug & Play, яке є різними комбінаціями драйверів з адаптерними платами.

Для знайомства з технологією Augmented Switching пропонується кілька тестових наборів розробника, куди входить сам драйвер з адаптерною платою, карбід-кремнієвий силовий модуль (рис. 15а), програматор (рис. 15б) і спеціальне ПЗ, за допомогою якого програмується драйвер (рис. 15в).

Всі продукти серії Augmented Switching та відповідні тестові набори розробника можна знайти на сайті Microchip [за цим посиланням](#).

## ІНТЕГРОВАНІ СИЛОВІ ЗБІРКИ

Інтегровані силові збірки (рис. 16) розроблені спеціально для аерокосмічного та оборонного ринку. Вони поєднують

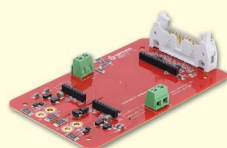


Gate Driver Cores

2ASC-12A1HP

2ASC-17A1HP

2ASC-12A2HP



Module Adapter Boards

62CA1

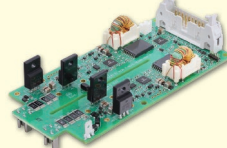
SP6CA1

EDCA1

XMCA1

SP6CA3

62CA4



Plug and Play Drivers

62EM1

EDEM3

HPFM

Рис. 14. Номенклатура драйверів Augmented Switching

ють у собі силові модулі та електроніку для керування, які розміщені в корпусі, що здатен витримувати відповідні навантаження. Пристрої розраховані на напругу 1200 В, потужність становить від 5 до 20 кВА. На даний момент випускається два види збірок: гібридний силовий привід (*Hybrid Power Drive, HPD*) і модуль керування живленням (*Power Control Module, PCM*). HPD містить у собі 3-фазний міст, привод соленоїдної котушки та драйвери відповідних силових транзисторів. PCM представляє собою HPD, на який додатково встановлена цифрова плата керування з функціями телеметрії та контролю.

Зазначені пристрої спочатку розроблялися на основі карбід-кремнієвих транзисторів, але існують також версії на основі транзисторів IGBT. Усі ці варіанти пройшли повний спектр випробувань на відповідність вимогам авіаційних стандартів. Збірка HPD510, яка має гвинтові клеми, додатково пройшла програму сертифікації Airbus як лінійний замінюваний блок для літальних апаратів (*Line Replaceable Unit*). Збірку HPD520 з виводами для пайки розроблено в рамках французької аерокосмічної програми Genote та сертифіковано як блок авіоніки для монтажу на плату (*Board Mounted Unit*). Обидва пристрої також пройшли тестування на вплив нейтронного випромінювання, що дозволяє використовувати їх на великих висотах, у космосі та в радіаційно-стійких виробках.

Інтегровані силові збірки можна знайти на сайті Microchip за такими посиланнями:

- [загальне посилання](#);
- [HPD510 \(MAIPDMC40X120\)](#);
- [PCM510 \(MAICMMC40X120\)](#).

## ПРОГРАМНІ ТА АПАРАТНІ ЗАСОБИ РОЗРОБКИ

Уякості програмного засобу розробки Microchip пропонує **безкоштовний аналоговий симулятор MPLAB Mindi**. Для роботи з ним на кожен карбід-кремнієвий транзистор і діод Microchip розроблені SPICE та PLECS-моделі двох рівнів. Під рівнем 1 мається на увазі електрична модель, а під рівнем 2 — електрична та теплова моделі. Їх можна завантажити із сайту Microchip [за цим посиланням](#).

У відношенні апаратних засобів розробки також пропонується широкий вибір продуктів:

- 30 kW 3-phase Vienna PFC Technology Demonstrator;



## Унікальні ПЛІС за технологією flash-based

### PolarFire

- базовий розмір 28 нм
- від 100К до 500К логічних елементів
- програмний процесор RISC-V
- від 8 до 24 модулів SerDes по 12,7 Гбіт/с
- 2 модулі PCIe Gen.2
- унікальний форм-фактор:
  - 11x11 мм для щільності 100К
  - 11x14 мм для щільності 200К
  - 16x16 мм для щільності 300К



### Igloo2 та SmartFusion2

- базовий розмір 65 нм
- від 5К до 150К логічних елементів
- програмний процесор RISC-V
- апаратний процесор Cortex-M3
- до 16 модулів SerDes по 5 Гбіт/с
- до 4 модулів PCIe

### Igloo та ProASIC3

- базовий розмір 130 нм
- від 100 до 30К логічних елементів
- програмний процесор Cortex-M1
- корпуси від 3x3 мм

- впровадження в літаках:

- Airbus A350
- Boeing 787
- Lockheed Martin F-35



## Чому?

- мінімальне енергоспоживання – на 50% менше, ніж конкурентні ПЛІС
- стійкість до збоїв конфігурації
- відсутність зовнішньої завантажувальної flash-пам'яті
- миттєва готовність до роботи після включення
- найменші розміри корпусів
- запобігання викраденню та клонуванню IP-ядер
- анти-тамперінг
- багата спадщина у цивільній та військовій авіації



**Rainbow Technologies • [www.rainbow.com.ua](http://www.rainbow.com.ua)**

04112, Україна, м. Київ, вул. Дегтярівська, 62, оф. 46

Тел./факс: +38 (044) 290 41 69 (82)

[svl@rainbow.com.ua](mailto:svl@rainbow.com.ua)

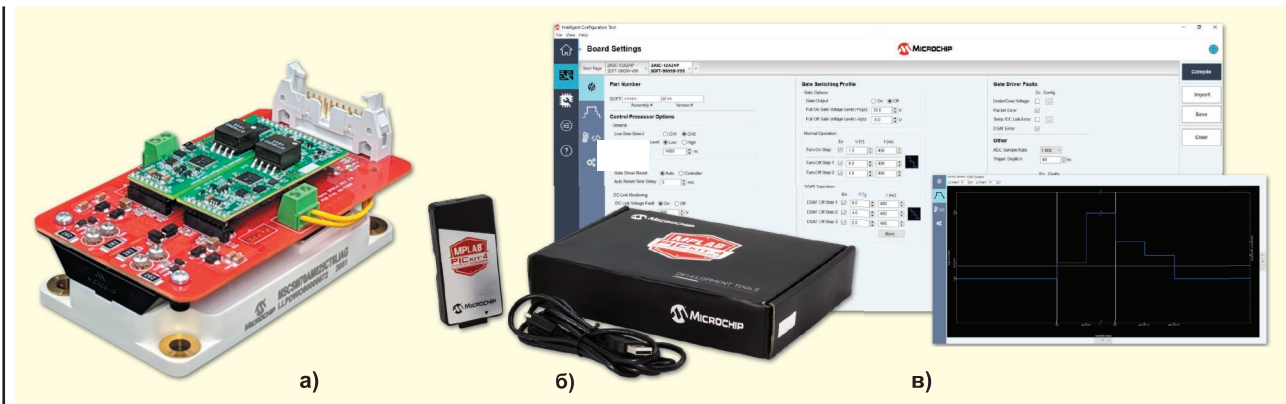


Рис. 15. Тестовий набір розробника: драйвер з адаптерною платою та карбід-кремнієвий силовий модуль (а); програматор (б) і спеціальне ПЗ (в)

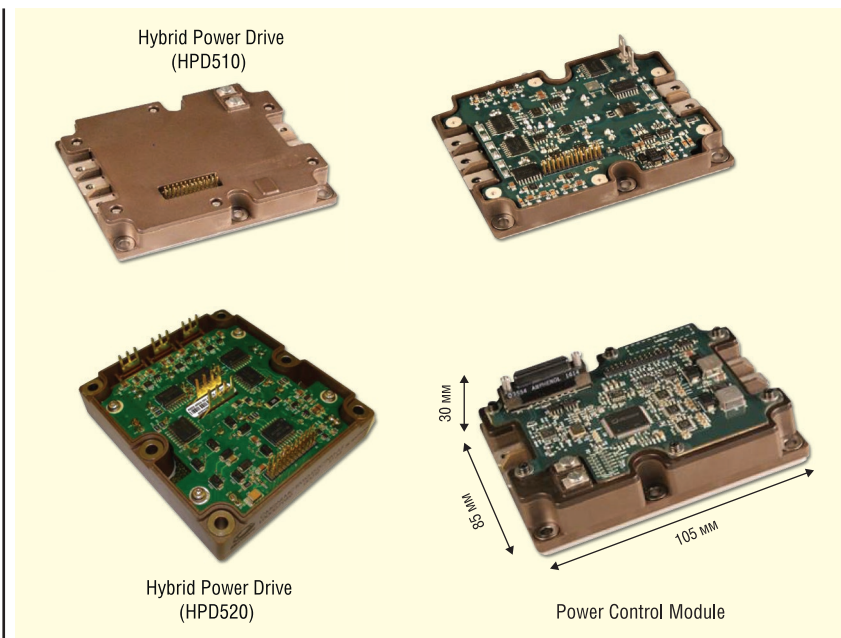


Рис. 16. Інтегровані силові збірки

- 30 kW Dual PSFB DC-DC Technology Demonstrator;
- 150 kVA 3-phase SiC Power Stack Evaluation Kit;
- 400/800VDC, 30A Solid State Circuit Breaker Technology Demonstrator;
- 60W Auxiliary Power Supply with 250 – 1000VDC input Reference Design;
- Half bridge ASD2 gate driver and SiC MOSFETs in TO-247 Evaluation Board;
- SP6LI Module Evaluation Board.

Їх можна поділити на 3 групи. До однієї відносяться традиційні тестувальні плати та набори розробника, призначені для освоєння напівпровідникових продуктів Microchip. Інша група називається **демонстратори технології** та являє собою обладнання, в якому реалізовані передові технологічні рішення системного рівня, що демонструють переваги силових ключів Microchip. Третя група — це

**еталонні розробки**, які є готовими технічними рішеннями «під ключ» і можуть бути запущені в серійне виробництво.

Насамкінець варто відзначити переваги роботи з компанією Microchip, як з партнером по бізнесу (рис. 17). Стратегія цієї компанії базується на трьох складових — якість, надійність постачання та клієнтська підтримка. Про якість продуктів вже сказано вище за текстом. Надійність поставок забезпечується налагодженими зв'язками з постачальниками сировини і комплектуючих, які дублюють один одного і не є конкурентами Microchip. Крім того, виробництво кожного виду продукції не зав'язане на один завод, а дублюється в декількох місцях. Зокрема, нещодавно було побудовано нове підприємство в Колорадо-Спрінгс, яке вже виробляє карбід-кремнієві діоди та готується до випуску SiC транзисторів. Що стосується підтримки, то тут

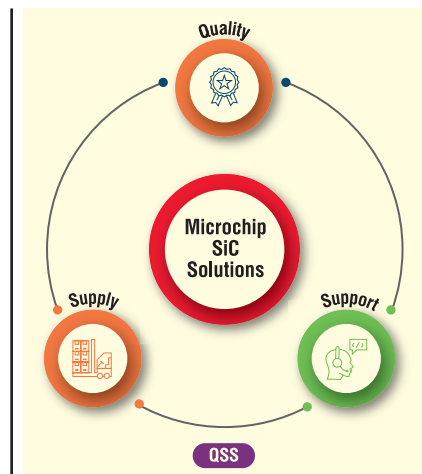


Рис. 17. Стратегія компанії Microchip базується на трьох складових — якість, надійність постачання та клієнтська підтримка

потрібно згодати про фірмову політику No End of Life, що означає виробництво кожного продукту до тих пір, поки клієнти будуть його купувати. Можливість придбання будь-якої кількості напівпровідників і комплексна технічна підтримка протягом усього життєвого циклу надається кожному клієнту — незалежно від обсягу його замовлень.

**Більш детальну інформацію можна отримати, звернувшись до офіційного дистриб'ютора Microchip Technology на території України — компанії Rainbow Technologies:**

**04112, Україна,  
м. Київ, вул. Дегтярівська, 62,  
оф. 46,  
тел./факс: (044) 290-41-69,  
(044) 290-41-82,  
e-mail: svl@rainbow.com.ua,  
www.rainbow.com.ua**

CN

\* Закінчення. Початок див. CHIP NEWS, № 3, 2023.