

IGBT 7-го покоління – практичний погляд на переваги електроприводів

Райнер Вайс (Rainer Weiss), Штефан Хаузер (Stefan Häuser), Semikron Danfoss
Переклад та редагування: Володимир Павловський, к.т.н, с.н.с.,
Інститут електродинаміки (ІЕД) НАН України

IGBT 7-го покоління на 1200 В є новою «робочою конячкою» у світі силової електроніки. Вони розроблені спеціально для застосування в електроприводах і мають чотири конфігурації виконання.

IGBT 7-го покоління мають чотири основні переваги порівняно з попередніми поколіннями. Окрім вищої надійності завдяки підвищеній стійкості до вологи, це менші статичні втрати ($V_{ce,sat}$), підвищена здатність до перевантаження та менший фізичний розмір чипів.

Завдяки меншому розміру чипів IGBT 7-го покоління для того ж номінального струму, тепер можна дозволити більший номінальний струм чипа в тому самому корпусі модуля. Це дає можливість використовувати IGBT 7-го покоління у двох варіантах: або з тим самим номінальним струмом, але меншою площею чипів, або з тією самою площею чипів, але зі збільшеним номінальним струмом.

Статичні втрати в IGBT 7-го покоління менші, тоді як втрати на перемикання подібні до втрат у модулях 4-го покоління. Тому загальні втрати IGBT 7-го покоління також менші. Однак чип IGBT 7-го покоління має вищий тепловий опір $R_{th(j-c)}$ через менший розмір і, отже, гірше охолоджується. Все ж менші втрати в IGBT підвищують ефективність роботи і полегшують охолодження напівпровідникових модулів.

У цій статті детально розглянуті практичні приклади реалізації IGBT 7-го покоління та підкреслені одержані переваги. Приклади базуються на двох із чотирьох силових модулів SEMIKRON, оснащених IGBT 7-го покоління. Це SEMiX 3 Press-fit і MiniSKiiP; обидва є базовими виконаннями в застосуваннях для електроприводів. В обох варіантах виконання діапазон номінального струму можна розширити шляхом заміни IGBT 4-го покоління на IGBT 7-го покоління.

Максимальний номінальний струм в IGBT 7-го покоління для SEMiX 3 Press-fit становить 600А з напівмостом SEMiX603GB12E4. З використанням IGBT 7-го покоління максимальний номінальний струм збільшується на 16%, до 700 А з напівмостом SEMiX703GB12M7, і також доступна версія напівмосту SEMiX603GB12M7 на 600 А.

У серії MiniSKiiP ми розглянемо найбільш потужні шестиполокові модулі. Модуль SKiiP39AC12T4V1 на основі IGBT 4-го покоління оснащений 3-фазним інвертором з номінальним струмом IGBT 150 А. При переході на IGBT 7-го покоління в одному виконанні стають доступними два варіанти.

Перший полягає в установці того самого номінального струму чипа, щоб зробити SKiiP39AC12T7V1 з номінальним струмом 150 А. Як альтернативу в модуль SKiiP39AC12T7V10 можна вбудувати чип IGBT такої ж площі, але з більшим номінальним струмом. Це робить його силовим модулем, який розрахований на струм у 200 А. Звичайно, MiniSKiiP з IGBT 7-го покоління також доступний в інших типових виконаннях електроприводів, наприклад, таких як CIB (*Converter-Inverter-Brake, конвертер-інвертор-гальмо*) або напівмостові конфігурації.

ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ

У застосуваннях електроприводів зазвичай ланкою, що обмежує потужність, є модуль IGBT. Електричні машини, як правило, мають коефіцієнт потужності ($\cos\phi$) від 0.7 до 0.95. Тому під час кожного циклу перемикання в електроприводах електродвигунів струм через модулі IGBT протікає довше, ніж через зустрічно-паралельні діоди зі зворотним увімкненням. Саме тут IGBT 7-го покоління можуть максимально використати свої переваги.

Перш ніж приступити до детального порівняння, давайте ближче розглянемо ще одну перевагу IGBT 7-го покоління: їх покращену електромагнітну сумісність в системах електроприводу. Швидкість зміни напруги (dv/dt) на виході інвертора сучасних IGBT-чипів зазвичай відносно висока через їх швидке перемикання. Разом із ємністю кабелю ця зміна напруги викликає паразитний ємнісний струм витoku I_{cap} . Він протікає через ємність екранів кабелю електродвигуна та ємність обмотки електродвигуна до потенціалу «землі». Цей струм розраховують як $I_{cap} = (C_{cable} + C_{motor}) \cdot dv/dt$; він діє у вигляді сплесків струму при кожному перемиканні модуля.

Це призводить до виникнення кондуктивних електромагнітних завад та завад, що випромінюються електроприводом. Такі завади потрібно зменшити до певних регламентованих значень відповідно до вимог норм і стандартів, яких необхідно дотримуватися. Для цього використовуються спеціальні електромережні протизавадні RFI-фільтри (*Radio Frequency Interference, RFI*). Крім того, достатньо великий ємнісний струм додається до вихідного струму електроприводу електродвигуна, і з-за цього, можливо, доведеться вибрати електропривод з більшим номінальним струмом. До того ж ємнісні струми призводять до додаткових втрат потужності в напівпровідниковому модулі. Нарешті, високе значення dv/dt може також викликати струми в підшипниках

електродвигуна, що призведе до передчасного ламання підшипників і необхідності використання дорогих ізолюваних підшипників.

Зменшення значення dv/dt зменшить ємнісні струми та всі вищезгадані ризики. З іншого боку, повільніше перемикання призведе до збільшення втрат при перемиканні, знижуючи ефективність роботи електропривода електродвигуна. Отже, вигідно застосовувати відносно повільний IGBT з низькими втратами на перемикання. Тут IGBT 7-го покоління серйозно допоможе досягти низьких значень dv/dt і одночасно прийнятних втрат на перемикання.

ПОВЕДІНКА МОДУЛІВ ПІД ЧАС УВІМКНЕННЯ

Коли IGBT увімкнено, струм поступає на цей IGBT від додаткового зворотно увімкненого діода, а коли він вимкнений — навпаки. Тому швидкість перемикання IGBT не тільки впливає на рівень електромагнітних завад, але також на втрати перемикання у діоді та IGBT.

Як правило, швидше увімкнення IGBT зменшує втрати IGBT і водночас збільшує втрати діода. Оскільки втрати діодів набагато нижчі, ніж в IGBT, загальні втрати визначаються втратами в IGBT. Однак втратами у діодах не можна повністю нехтувати. Опір у колі затвора визначає швидкість перемикання IGBT. Щоб знайти швидкість, оптимізовану з точки зору електромагнітної сумісності (EMC), корисно спочатку визначити опір у колі затвора, з яким можна отримати найвищу швидкість перемикання. Як для IGBT 4-го покоління, так і для IGBT 7-го покоління цей параметр визначають для холодного (за кімнатної температури) $p-n$ -переходу та відносно низьких значень струму.

Температурний вплив у IGBT 7-го покоління набагато менший, ніж у його попередника. Для прикладу ми порівняємо швидкість зменшення напруги у двох модулях SEMiX 3 Press-fit з номінальним струмом 600 А та IGBT 4-го і 7-го поколінь. Порівняння стосується системи з напругою ланки постійного струму 600 В і струмом навантаження 300 А. При температурі $p-n$ -переходу 150 °С і резисторі номіналом 2 Ом у колі затвора обидва покоління показують значення dv/dt 2.5 кВ/мкс. При 25 °С швидкість зменшення напруги IGBT 7-го покоління зростає до помірного значення 4.2 кВ/мкс, тоді як в IGBT 4-го покоління вона перевищує 15 кВ/мкс.

Швидкість зменшення напруги $dv/dt = 4.2$ кВ/мкс є прийнятним значенням для застосування в електроприводах загального призначення. Оскільки найвища швидкість має місце при низьких температурах, опір резистора у колі затвора слід вибирати найменшим з можливих за кімнатної температури. Щоб обмежити швидкість зменшення напруги значенням 4.2 кВ/мкс, резистор затвора IGBT 4-го покоління потрібно збільшити з 2 до 4.8 Ом. Втрати на комутацію збільшуються зі збільшенням температури $p-n$ -переходу, тому порівняння таких втрат слід проводити при температурі 150 °С. Тут збільшення опору резисторів у колі затвора збільшує втрати на увімкнення IGBT для IGBT 4-го покоління з 30 до 48 мДж (+60%). Як пояснювалося вище, втрати у діодах зменшуються зі збільшенням втрат при увімкненні IGBT; у цьому випадку з 20 до 17 мДж (-20%).

Через домінування втрат IGBT сумарні втрати на увімкнення одного IGBT 4-го покоління збільшуються на 28%, до 64 мДж для швидкості зменшення напруги 4.2 кВ/мкс, порівняно зі швидкістю 15 кВ/мкс. Це трохи більше, ніж в IGBT 7-го покоління при 62 мДж. На рисунку 1 показано точну

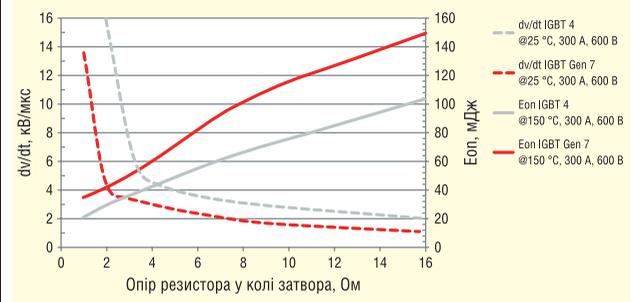


Рис. 1. Залежність швидкості зменшення напруги dv/dt і втрат на увімкнення E_{on} від опору резистора $R_{gate,on}$ у колі затвора силового модуля

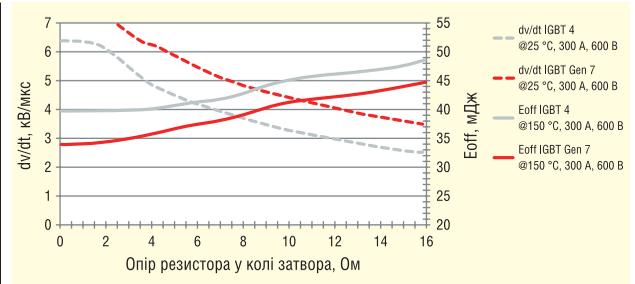


Рис. 2. Швидкість наростання напруги dv/dt і втрати на вимкнення E_{off} залежно від опору резистора $R_{gate,on}$ у колі затвора силового модуля

залежність швидкості зменшення напруги dv/dt при 25 °С і втрат на увімкнення при 150 °С від номіналу резистора у колі затвора.

ПОВЕДІНКА МОДУЛІВ ПІД ЧАС ВИМКНЕННЯ

Під час вимкнення швидкість зростання напруги dv/dt збільшується зі збільшенням струму. Тому великий струм навантаження спричиняє великі електромагнітні завади. З пониженням температури $p-n$ -переходу швидкість зміни напруги збільшується, як це відбувається під час увімкнення IGBT, але під час вимкнення такий ефект набагато менш виражений. Загалом градієнти напруги також менші, коли IGBT вимикається, ніж коли він вмикається. Однак вплив опору затвора на швидкість наростання напруги також дуже обмежений. Підсумовуючи, можна сказати, що умови генерації найбільших електромагнітних завад — це низька температура та великий струм модуля. Це стосується IGBT як 4-го покоління, так і 7-го покоління.

Таким чином, порівнюючи силові модулі SEMiX 3 Press-fit з номінальним струмом 600 А, можна зробити висновок, що швидкість наростання напруги при вимкненні IGBT 7-го покоління приблизно на 20% вища, ніж у IGBT 4-го покоління. Щоб одержати однаковий рівень електромагнітних завад для IGBT обох поколінь, у коло затвора модуля SEMiX603GB12M7 необхідно ставити резистор з більшим опором. Це збільшить втрати на вимкнення. Метою є обмеження швидкості наростання напруги до 4.2 кВ/мкс, щоб урівняти її зі швидкістю зменшення напруги під час увімкнення модуля. Для IGBT 4-го покоління потрібен резистор з опором 7.1 Ом у колі затвора, у порівнянні з опором 12 Ом для IGBT 7-го покоління. Це призводить до близьких значень втрат при вимкненні — 41 мДж для SEMiX603GB12E4 і 42 мДж для SEMiX603GB12M7, як показано на рисунку 2.

МЕНШІ ВТРАТИ, ВИЩА ПОТУЖНІСТЬ

Загальні втрати на перемикання є сумою втрат на вмикання та вимикання IGBT і втрат на перемикання зворотно увімкненого діода. Якщо швидкість зміни напруги обмежена значенням 4.2 кВ/мкс, загальні втрати на перемикання обох поколінь IGBT з однаковим номінальним струмом модуля на 600 А приблизно однакові: 104 мДж для IGBT 7-го покоління і 105 мДж для IGBT 4-го покоління. Однак завдяки нижчій на 20% напрузі насичення $V_{ce,sat}$ загальні втрати потужності IGBT 7-го покоління нижчі. Для прямого порівняння подивимось на втрати потужності з попередньо вибраними резисторами затвора, тактовою частотою ШІМ 2 кГц і максимальною температурою $p-n$ -переходу 150 °С.

Таке порівняння показує, що IGBT 7-го покоління може зменшити втрати на 13% — з 504 Вт на один ключ до 439 Вт на один ключ (SEMiX603GB12M7p), або на 19% — до 409 Вт на один ключ (SEMiX703GB12M7p) (рис. 3).

Ці зменшені втрати безпосередньо перетворюються на економію в рахунку за електроенергію. У наведеному вище прикладі економія на втратах становить 95 Вт на один ключ. Враховуючи, що вартість електроенергії складає ≈ 0.16 євро/кВт-год (з ПДВ, ціна взята з урахуванням тарифів на електроенергію для побутових споживачів (промислових підприємств) на початок 2024 року) і 4000 годин роботи на рік, це призводить до гарантованої економії 365 євро щороку ($6 \cdot 95 \text{ Вт} \cdot 4000 \text{ год/рік} \cdot 16 \text{ центів/кВт-год} \approx 365 \text{ євро/рік}$, з ПДВ). Крім цієї очевидної переваги, також можна зменшити витрати на охолодження. Втрати, яких немає, не нагрівають напівпровідники і не потребують зусиль по їх розсіюванню.

Подальшої економії можна досягти конструкцією радіатора або охолодженням шафи, де встановлено електропривод електродвигуна. В іншому варіанті використання економічна доцільність досягається шляхом зміни конфігурації корпусу і більшої густини потужності на рівні системи: корпус того ж розміру можна розрахувати на більший номінальний струм інвертора, враховуючи рекомендовану температуру $p-n$ -переходу у 150 °С як проєктне обмеження. Струм можна збільшити з 473 А для модуля SEMiX603GB12E4 до 506 А (+7%), використавши модуль SEMiX603GB12M7. З модулем SEMiX703GB12M7 струм навіть збільшується до 536 А (+13%). На рисунку 4 показано детальне порівняння для тактової частоти ШІМ у 2 кГц.

Переходячи до серії MiniSKiiP, ми зробимо пряме порівняння трьох вищезазначених шестиблоккових модулів на основі прикладних даних, яке показує переваги IGBT 7-го покоління: для однакового струму навантаження (тут 100 Arms) більший чип на 200 А зменшує втрати на 12 Вт на один ключ порівняно з меншим чипом на 150 А 7-го покоління. Це складає від 5 до 10% загальних втрат у IGBT залежно від тактової частоти ШІМ (рис. 5).

Потужність розсіювання IGBT 7-го покоління у MiniSKiiP значно нижча, ніж у IGBT 4-го покоління, тобто 15% (12 Вт) при 2 кГц для того самого струму чипа, збільшуючись навіть до 24% (19 Вт) для більшого чипа. Це економить витрати на електроенергію понад 45 євро на рік для одного користувача, на основі вартості електроенергії ≈ 0.16 євро/кВт-год (з ПДВ, ціна взята з урахуванням тарифів на електроенергію для побутових споживачів (промислових підприємств) на початок 2024 року) та 4000 год. роботи на рік ($6 \cdot 19 \text{ Вт} \cdot 4000 \text{ год/рік} \cdot 16 \text{ центів/кВт-год} \approx 73 \text{ євро/рік}$, з ПДВ) порівняно з IGBT 4. Крім того, менша потужність розсіювання дозволяє збільшити струм навантаження або так-

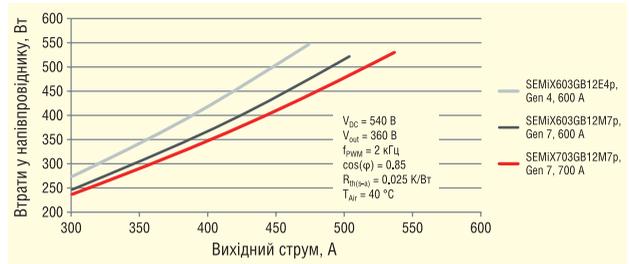


Рис. 3. Втрати у напівпровіднику залежно від вихідного струму

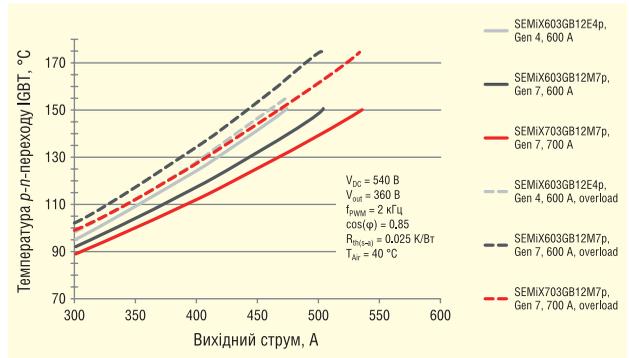


Рис. 4. Залежність температури $p-n$ -переходу IGBT від вихідного струму

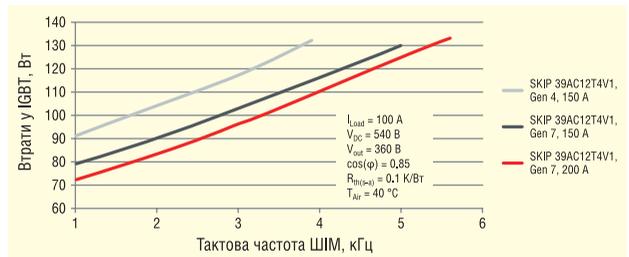


Рис. 5. Залежність втрат у IGBT від тактової частоти ШІМ

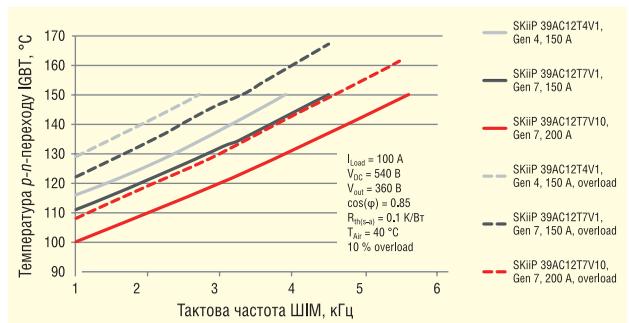


Рис. 6. Залежність температури $p-n$ -переходу IGBT від тактової частоти ШІМ

тову частоту ШІМ. Так, для струму навантаження 100 Arms з IGBT 4-го покоління максимально можлива тактова частота складає лише 3.9 кГц. Для IGBT 7-го покоління, які розраховані на такий же номінальний струм чипа, ця частота підвищується до 4.5 кГц, а з більшим струмом чипа — навіть до 5.6 кГц (рис. 6).

Обмежувальним фактором є максимально допустима температура $p-n$ -переходу 150 °С для безперервної роботи чипа IGBT. Ще однією альтернативою може бути збільшення безперервного струму навантаження зі 115 до 122 А (для 7-го покоління на номінальний струм 150 А), або навіть

до 138 А (для 7-го покоління на номінальний струм 200 А) для тактової частоти ШІМ 2 кГц.

ДОДАТКОВА ПЕРЕВАГА: ПЕРЕВАНТАЖЕННЯ

Використовуючи IGBT 4-го покоління, не можна допускати перевантаження по струму, оскільки з міркувань безпеки не рекомендується перевищувати температуру 150 °С р-п-переходу. Однак для IGBT 7-го покоління можна додатково підвищити температуру р-п-переходу до 175 °С впродовж однієї хвилини. Заміна SEMiX603GB12E4 на IGBT 7-го покоління дає можливість збільшити струм перевантаження до 592 А для SEMiX603GB12M7 та до 632 А для SEMiX703GB12M7 (рис. 7).

Для MiniSKiiP можна впродовж однієї хвилини використовувати додатковий струм перевантаження, який в 1.12 або 1.14 раза перевищує безперервний струм навантаження (рис. 8).

Якщо експлуатація IGBT 4-го покоління передбачає струм перевантаження, безперервний струм необхідно зменшити на 9%, від 115 до 105 А, щоб зарезервувати можливість для 10% короткочасного перевантаження по струму впродовж 1 хвилини.

ВИСНОВОК

IGBT 7-го покоління мають ряд переваг для застосування у електроприводах порівняно з попередніми версіями IGBT. Окрім підвищеної надійності завдяки новій технології чипів, менший розмір, менші статичні втрати та оптимізація процесів увімкнення і вимкнення силового ключа дозволяють досягти вищої густини потужності в заданих корпусах силових модулів.

Зокрема, одним з основних обмежень у розробках електроприводів є швидкість зміни напруги dv/dt на виході інвертора. IGBT 7-го покоління демонструють менші втрати потужності при фіксованому значенні dv/dt порівняно з IGBT 4-го покоління. Як наслідок, це одразу ж економить загальну вартість експлуатації (*Total Cost of Ownership, TCO*). Як альтернатива, у заданій конструкції менші втрати потужності можна перетворити на вищу вихідну потужність або вищу частоту ШІМ. Крім того, у специфікацію інвертора можна додати вбудовану здатність до перевантаження без необхідності мати спеціально спроектований резерв, як у випадку з IGBT 4. Модулі IGBT 7-го покоління наразі доступні у виконаннях SEMiTOP E1/E2 (0.37–30 кВт), MiniSKiiP (0.37–110 кВт), SEMiX 6 Press-fit (15–75 кВт) і SEMiX 3 Press-fit (55–250 кВт і вище) (рис. 9).

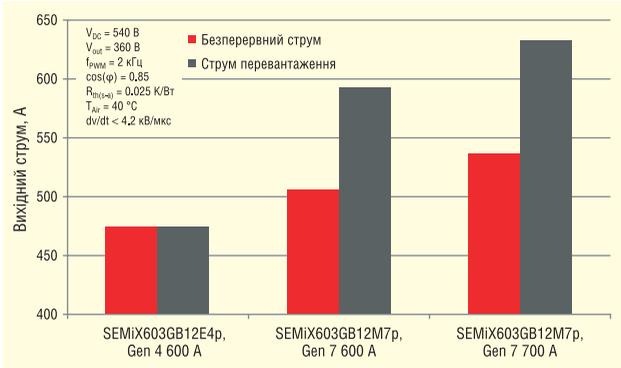


Рис. 7. SEMiX 3 Press-fit: безперервний струм і струм перевантаження для максимальної температури р-п-переходу IGBT

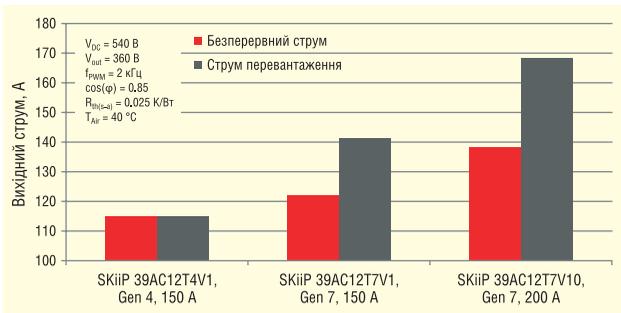


Рис. 8. MiniSKiiP: безперервний струм і струм перевантаження для максимальної температури р-п-переходу IGBT

Варіанти виконання MiniSKiiP і SEMiTOP без базової плати включають шестиблокову і CIB топології; MiniSKiiP також охоплює напівмостові топології. Модуль SEMiX 6 Press-fit має конструкцію базової плати, яка підходить для CIB і Sixpack. Модуль SEMiX 3 Press-fit — це напівмостовий модуль, який також має базову пластину. Модулі випрямляча у виконаннях MiniSKiiP і SEMiX доповнюють цей асортимент, щоб запропонувати повне рішення від Semikron Danfoss для електроприводів.

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

03057, м. Київ, пр-т Берестейський, 56, офіс 335, тел. +38 (044) 458-47-66, (067) 463-46-62, (095) 284-96-62, e-mail: semikron@ukr.net, service_danfoss@ukr.net www.semismart.com.ua, www.tsdrive.com.ua CN



Модулі для електроприводів малої потужності

SEMiTOP E1/E2: 0.37–30 кВт

Модулі для електроприводів з потужністю від малої до середньої

MiniSKiiP: 0.37–110 кВт, SEMiX 6 Press-fit: 15–75 кВт

Модулі для електроприводів з потужністю від середньої до великої

SEMiX 3 Press-fit: 55–250 кВт

Рис. 9. Первинна лінійка продуктів SEMIKRON з використанням IGBT 7-го покоління