

# Конфігурація драйвера затвора та захист від короткого замикання для 3-рівневих топологій

**Йоахім Ламп (Joachim Lamp), Інго Рабл (Ingo Rabl), Semikron Danfoss**  
**Переклад: Володимир Павловський, к.т.н, с.н.с., Інститут електродинаміки (ІЕД)**  
 НАН України  
**Редагування Сергій Поліщук, к.т.н, с.н.с., ТОВ НВП «Техносервіспривід»**  
 E-mail: sp.tsdrive@gmail.com

**3-рівневі топології в основному використовуються в системах безперебійного електроживлення та сонячній енергетиці завдяки їхній високій ефективності та низькому рівню нелінійних спотворень в електромережі. У даній статті описано керування силовими напівпровідниками та їх захист у тривірневих топологіях NPC та TNPC. У цьому контексті термін «IGBT» є синонімом силових напівпровідників. Важливими моментами у проектуванні драйвера є обмеження напруги на IGBT та стратегія поведінки при виникненні коротких замикань. Ці моменти визначили структуру даної статті.**

## 3-РІВНЕВА ТОПОЛОГІЯ

Найпоширенішими тривірневими топологіями є NPC та TNPC [1, 2]. Обидві топології мають чотири модулі IGBT на фазу і тому потребують чотирьох каскадів драйвера для керування модулями (рис. 1).

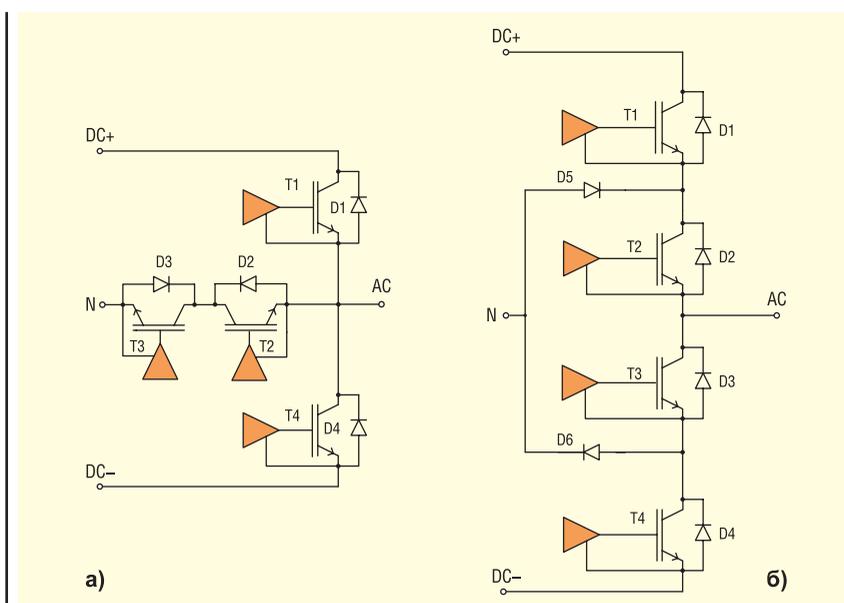
Каскади драйверів можуть містити один драйвер, але також комерційно доступні каскади з подвійними драйверами. Платформи драйверів Semikron Danfoss SKYPER42LJ та SKYPER12 особливо підходять для 3-рівневих застосувань завдяки можливості регулювання реакції на виявлення короткого замикання. На рисунку 2 показано можливі підключення подвійних драйверів до фазової стійки NPC. Це також стосується топології TNPC, оскільки обидві топології використовують однакову послідовність імпульсів. Згідно з рисунком 2, існують такі варіанти:

- драйвер 1 на IGBT T1 та T2, драйвер 2 на IGBT T3 та T4;
- драйвер 1 на зовнішніх IGBT та драйвер 2 на внутрішніх IGBT;

- драйвер 1 на T1 та T3, а драйвер 2 на T2 та T4.

У варіантах а) та б) повинна бути можливість вимкнути функцію блокування драйвера, оскільки обидва IGBT можуть бути увімкнені одночасно. У даній статті обговорюються приклади для обох варіантів.

У 3-рівневій топології IGBT T1 та T3 перемикаються з інвертуванням та затримкою блокування між станами перемикання. Таким чином, для варіанту в) можна використовувати стандартний драйвер напівмостової схеми з блокуванням та функцією часу затримки. Тоді контролер не потребує генерації часу затримки. Те саме стосується IGBT T2 та T4.



**Рис. 1.** Тривірневі топології TNPC (а) і NPC (б): IGBT T1 та T4 називаються «зовнішніми ключами», IGBT T2 та T3 – «внутрішніми ключами»

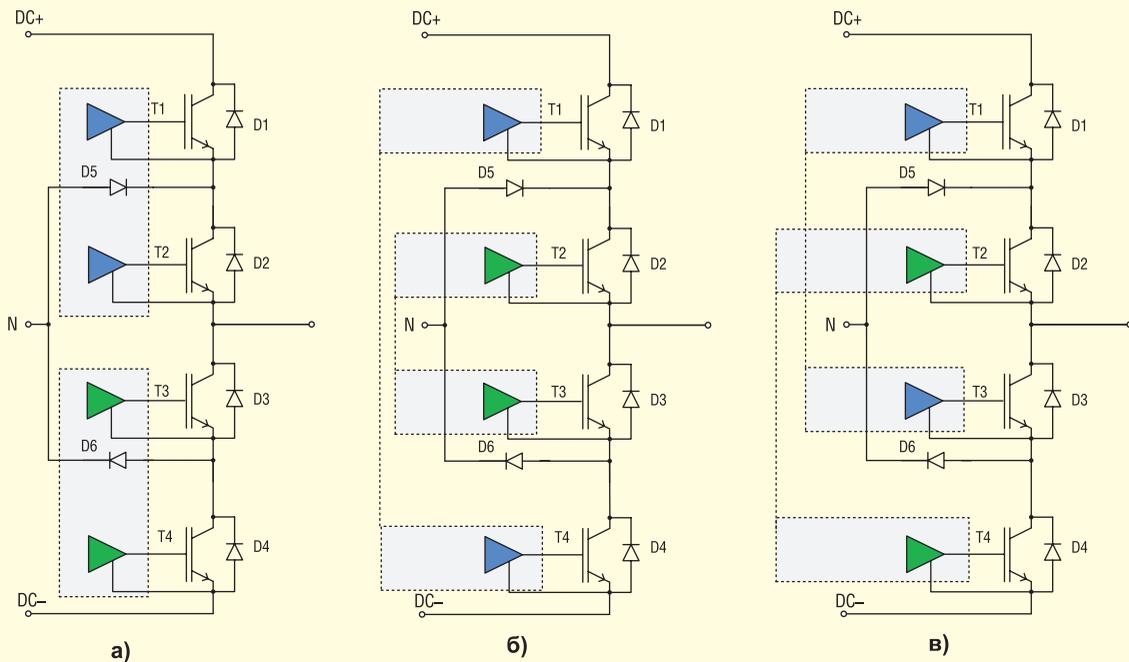


Рис. 2. NPC з подвійним драйвером

### АЛГОРИТМ ПЕРЕМИКАННЯ У 3-РІВНЕВОМУ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

#### Топологія NPC

Щоб захистити IGBT від надмірної напруги, зовнішні IGBT необхідно вимкати раніше від внутрішніх IGBT. Тоді струм комутується до діода D5 або D6, обмежуючи напругу на IGBT до половини напруги на шині постійного струму. Комутація позначена на рисунку 3 струмом позитивного напрямку. Аналогічна ситуація зі струмом негативного напрямку. Однак, якщо IGBT T2 вимкнено, а IGBT T1 увімкнено, струм буде комутуватися до діодів D3 та D4. Після цього до T2 прикладається повна напруга постійного струму. Якщо напруга постійного струму (VDC) буде вища за напругу запирання IGBT, він вийде з ладу.

#### Топологія TNPC

Як і у випадку з NPC, у конфігурації TNPC зовнішні IGBT слід вимкати раніше, ніж внутрішні.

Як показано на рисунку 4, струм комутується від T1 до D3 та T2. Однак, якщо T2 вимикається раніше T1, струм комутується до D4, а не до горизонтальної гілки D3, T2. Тоді комутація відбувається подібно до дворівневої схеми. Пік напруги збільшується, оскільки схема комутації більша, і прикладається повна напруга шини постійного струму.

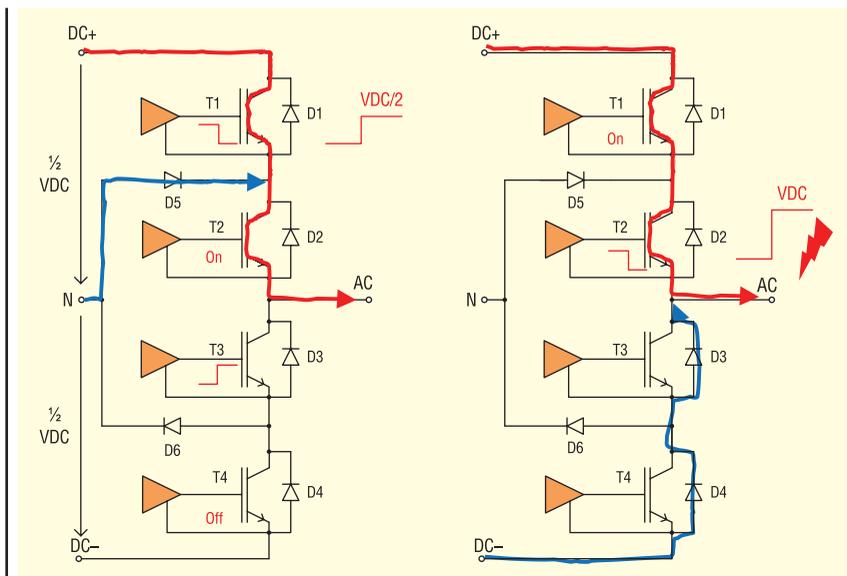


Рис. 3. NPC: правильний та неправильний алгоритми перемикання

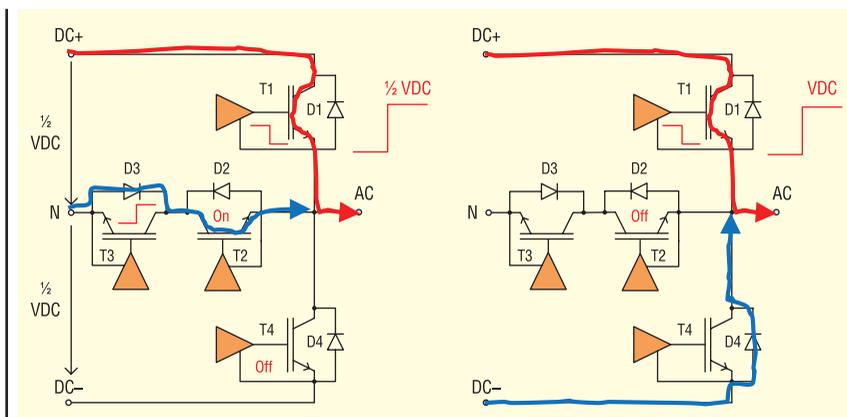


Рис. 4. TNPC: правильний та неправильний алгоритм перемикання

**НАПРУГА НА IGBT**

**Топологія NPC**

Топологія NPC має дві різні схеми комутації: коротку та довгу. На рисунку 5 показано схеми комутації для струму позитивного напрямку. Контур комутації позначений зеленим прямокутником. При активній потужності ( $I_{out} > 0$  та  $V_{out} > 0$ ) комутація відбувається в малому комутаційному контурі, а при реактивній потужності ( $I_{out} > 0$ ,  $V_{out} < 0$ ) — у великому контурі. Індуктивності розсіювання, а, отже, і пікова напруга під час комутації вищі у великому комутаційному контурі, ніж у малому. Для обмеження максимальної напруги можна більш точно підібрати номінали резисторів у колі затвора або обмежити напругу за допомогою так званої схеми «активного обмеження».

Слід зазначити, що в сучасних IGBT обмеження напруги за допомогою резисторів у колі затвора може відбуватися лише у певних межах [3].

У схемі активного обмеження діоди Зенера (стабілітрони) увімкнені між колектором і затвором (рис. 6). Рівень напруги, при якому починається її обмеження, визначається напругою пробоя ланцюжка діодів. Якщо під час вимикання IGBT напруга  $V_{CE}$  підвищується вище рівня обмеження стабілітрона, обмежувальні діоди починають проводити струм. Цей струм знову відкриває затвор, доки напруга  $V_{CE}$  не знизиться нижче опорної напруги стабілітрона.

**Топологія TNPC**

У топології TNPC внутрішні та зовнішні IGBT мають однакову схему комутації (рис. 7). Напруга запирання горизонтальних IGBT (T2, T3) часто нижча, ніж вертикальних IGBT (T1, T4).

Наприклад: Максимальна напруга ланки постійного струму = 1000 В.

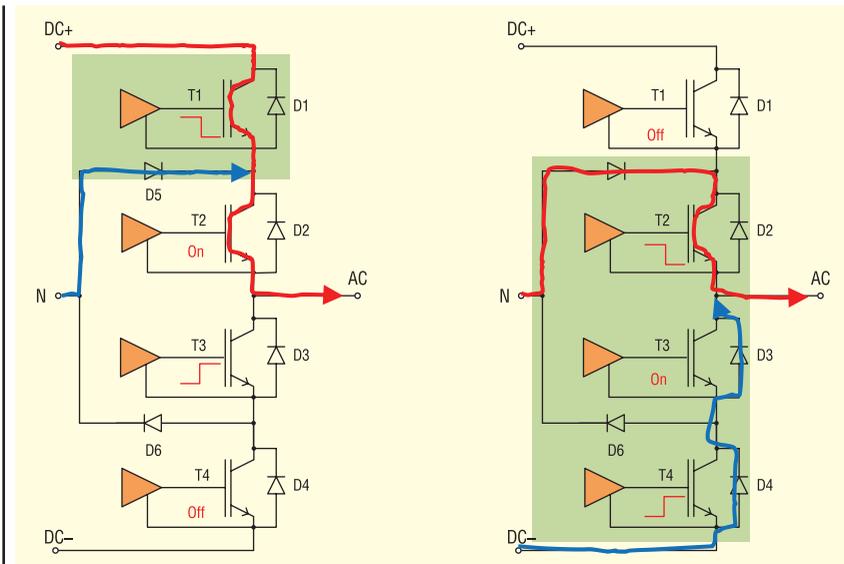
T1/T4 = модулі IGBT на номінальну напругу 1200 В разом з діодом. Запас = 1200 – 1000 = 200 В.

T2/T3 = модулі IGBT на номінальну напругу 650 В разом з діодом. Запас = 650 – 500 = 150 В.

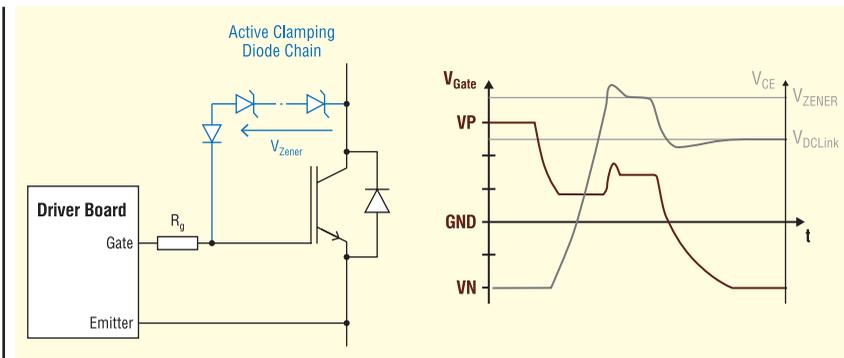
У цьому випадку для горизонтальних IGBT часто необхідні заходи обмеження напруги, наприклад активне обмеження.

**СЦЕНАРІЙ КОРОТКИХ ЗАМИКАНЬ**

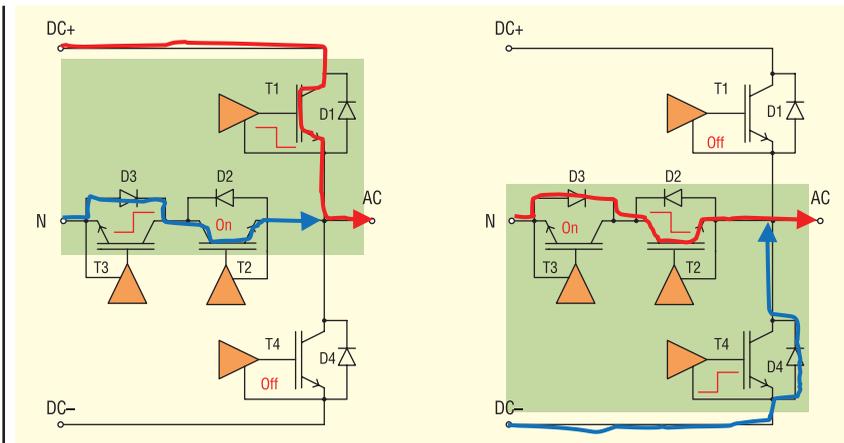
Далі розглянемо різні сценарії короткого замикання.



**Рис. 5. Короткий та довгий контури комутації у топології NPC**



**Рис. 6. Схема активного обмеження напруги**



**Рис. 7. Контури комутації у топології TNPC**

Коротке замикання виникає поза системою, за межами виводів пристрою (рис. 8). Передбачається, що інвертор має функцію вимірювання струму та мережевий дросель у кожній фазній стійці.

Коротке замикання всередині системи, перед дроселем (рис. 9). Це несправність всередині системи, наприклад, дефект ізоляції.

В обох випадках розрізняють такі типи коротких замикань:

- міжфазне;
- між фазою та ланкою постійного струму.

Для пояснення міжфазного короткого замикання нижче показано лише дві фази інвертора, а для короткого замикання фази на ланку постійного струму — лише одну фазу. На ілюстра-

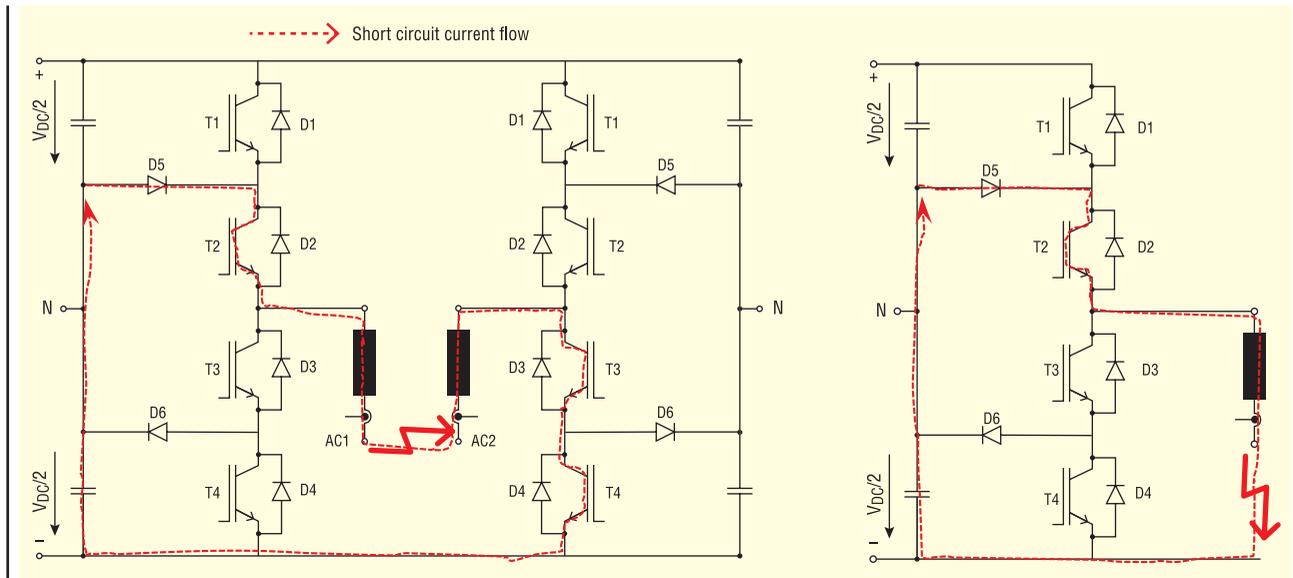


Рис. 8. Коротке замикання на виході інвертора

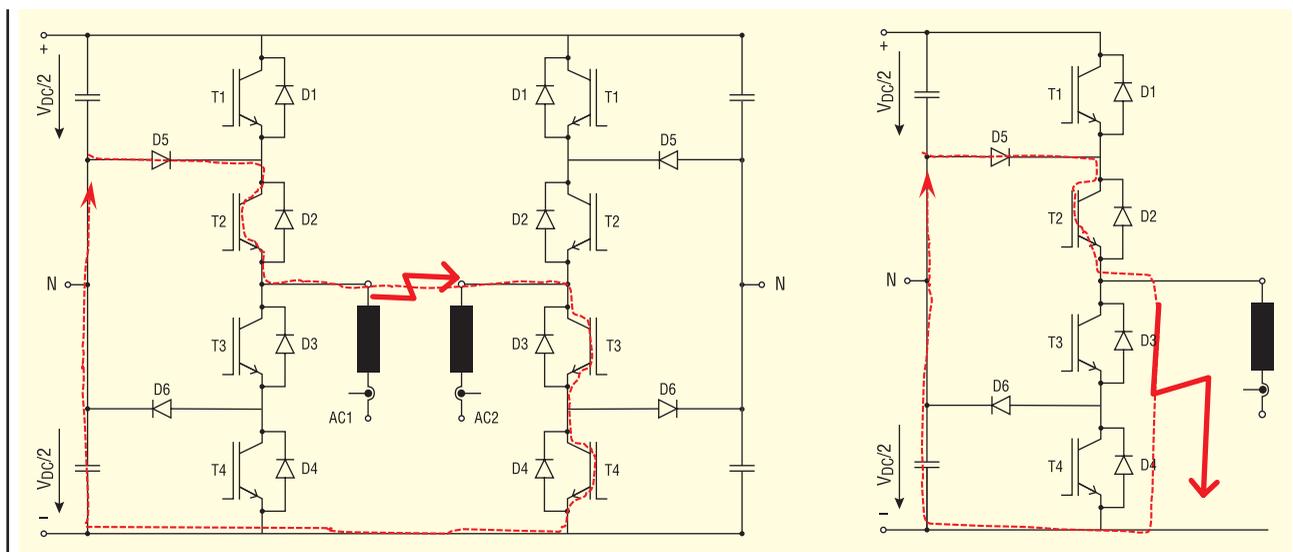


Рис. 9. Коротке замикання всередині інвертора

ціях розглянуто топологію NPC, але проведений аналіз справедливий і для топології TNPC.

### Коротке замикання на вході інвертора

Датчик струму знаходиться у колі короткого замикання. Коли досягається поріг перевантаження по струму, IGBT вимикаються у заданій послідовності: спочатку зовнішні, а потім внутрішні модулі. Всі IGBT необхідно вимкнути до того, як вони вийдуть зі стану насичення. Це вимагає як швидкого вимірювання струму, так і відповідного реагування. Позитивним ефектом є те, що наростання струму обмежується дроселем. Якщо розглядати лише цей тип короткого замикання, то для IGBT виявлення короткого замикання не потрібно. Однак,

якщо струм зростає, поки IGBT не вийде зі стану насичення (можливо, з-за того, що визначення струму занадто повільне), то цей випадок слід розглядати, як описано раніше.

Вихід зі стану насичення IGBT завжди відбувається при струмі, що в 3–8 разів перевищує номінальний; це може призвести до виходу з ладу IGBT. В [4], в розділі 5.7.2 більш детально пояснено вихід IGBT зі стану насичення. Пояснення щодо динамічного захисту від короткого замикання див. у технічному описі до плати драйвера [5, 6].

### Коротке замикання всередині інвертора

Струм короткого замикання не виявляється датчиком струму. Він зростає, поки IGBT не вийде зі стану насичення.

Зниження стану насичення IGBT виявляє динамічний захист від короткого замикання драйвера. Якщо коротке замикання відбувається поблизу модуля IGBT, його струм може зрости на декілька кА/мкс. Ця операція дозволена лише за умови, що в технічному описі IGBT регламентовано час короткого замикання ( $t_{psc}$ ).

Як показано на рисунку 9, під час короткого замикання між фазами струм завжди протікає через один із зовнішніх IGBT. Якби були задіяні лише внутрішні IGBT, струм короткого замикання не протікав би, оскільки у цьому контурі з'єднані лише N-потенціали. При короткому замиканні фази на ланку постійного струму можлива участь лише одного внутрішнього IGBT.

Іншим сценарієм короткого замикання є одночасне вмикання кількох

IGBT (наприклад, T2, T3 та T4) через неправильне керування модулями. Якщо напруга постійного струму вища за напругу запирання IGBT, то модуль, який увімкнено останнім (наприклад, T1), буде виведено з ладу перенапругою, якщо не діє функція активного обмеження напруги.

### Далі буде

**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](mailto:sp.tsdrive@gmail.com),  
[semikron@ukr.net](mailto:semikron@ukr.net),  
[www.tsdrive.com.ua](http://www.tsdrive.com.ua),  
[www.semismart.com.ua](http://www.semismart.com.ua)**

### Література:

1. [www.semikron-danfoss.com](http://www.semikron-danfoss.com)
2. І. Рабл (I. Rabl), П. Бекедаль (P. Beckedah), переклад: В. Павловський, редактування С. Поліщук. Топологія 3L NPC, TNPC та ANPC. CHIP NEWS № 6–8, 2026.
3. A. Wintrich. IGBT4 and free wheeling diode CAL4 in IGBT modules. AN-9001, Rev. 02, SEMIKRON INTERNATIONAL GmbH 2009.
4. A. Wintrich, U. Nicolai, W. Tursky, T. Reimann. Application Manual Power Semiconductors. 2nd edition, ISLE Verlag 2015, ISBN 978-3-938843-83-3.
5. J. Krapp. Technical Explanation SKYPER® 12". Rev. 05, SEMIKRON INTERNATIONAL GmbH 2017.
6. J. Krapp. Technical Explanations SKYPER® 42 LJ. Rev. 11, SEMIKRON INTERNATIONAL GmbH 2017.
7. І. Рабл. TE – SEMiX5 1200V MLI SKYPER12 Driver Board. Rev. 04, SEMIKRON INTERNATIONAL GmbH 2019.
8. І. Рабл. TE – SEMiX5 TMLI SKYPER12 Driver Board. Rev 06, SEMIKRON INTERNATIONAL GmbH 2019.
9. І. Рабл. TE – SEMiX5 1200V TMLI Parallel Driver Kit. Rev 04, SEMIKRON INTERNATIONAL GmbH 2019.
10. І. Рабл. TE – SEMiX5 1200V MLI Parallel Driver Kit. Rev. 06, SEMIKRON INTERNATIONAL GmbH 2019.
11. J. Lamp. TE – ST10 MLI Driver Board. Rev. 04, SEMIKRON INTERNATIONAL GmbH 2019.

CN

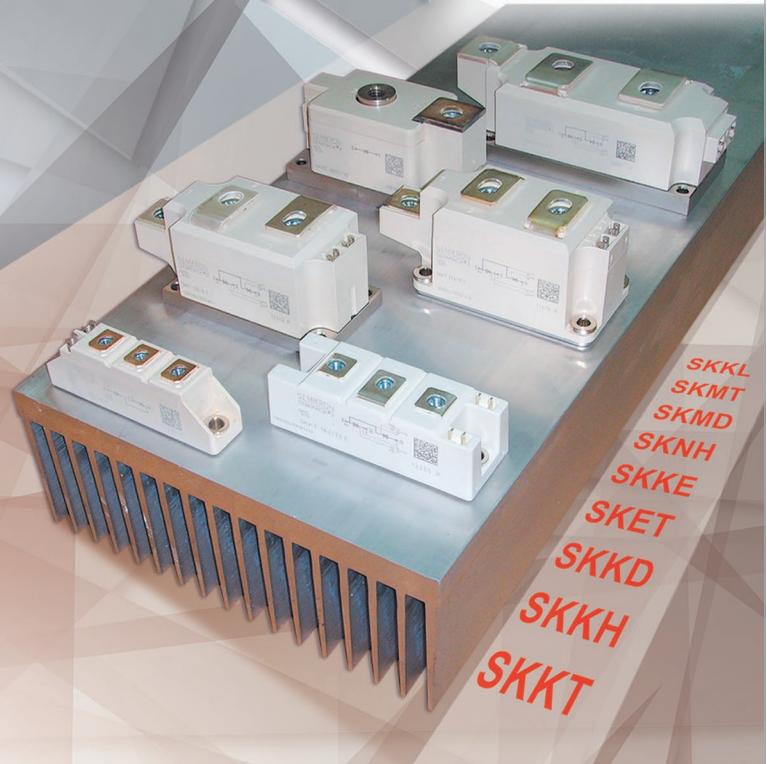
## НВП "ТЕХНОСЕРВІСПРИВІД"

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), [semikron@ukr.net](mailto:semikron@ukr.net)  
[www.tsdrive.com.ua](http://www.tsdrive.com.ua), [www.semismart.com.ua](http://www.semismart.com.ua)