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

ЗАХИСТ ВІД КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ

У разі короткого замикання на виході інвертора достатньо виявити перевантаження по струму за допомогою датчика струму в кожній фазі, як було показано раніше. У подальшому ми розглянемо більш серйозне внутрішнє коротке замикання інвертора.

Захист від міжфазного короткого замикання

Оскільки струм короткого замикання завжди протікає через один із зовнішніх IGBT, достатньо виявити коротке замикання на цих IGBT. У разі виявлення короткого замикання IGBT негайно вимикається через резистор м'якого вимкнення, номінал якого у багато разів перевищує номінал звичайного резистора у колі затвора. Така послідовність вимкнення дозволяє обмежити напругу на IGBT до допустимих значень. Струм комутується від зовнішніх IGBT до діодів D5 або D6. Сигнал помилки, згенерований драйвером, подається на контролер з боку користувача, який, своєю чергою, повинен вимкнути внутрішній перемикач за проміжок часу t_{psc}. Для захисту внутрішніх ключів від занадто високої напруги під час вимкнення за допомогою стандартного резистора R_g може знадобитися активна схема обмеження напруги.

Щоб підтримувати цю послідовність вимкнення, внутрішній IGBT не повинен вимикатися негайно, якщо на зовнішніх IGBT виявлено коротке замикання, а лише тоді, коли струм від IGBT комутується до діода D5 або D6. Це слід враховувати під час вибору драйверів та обробки сигналів помилок/несправностей. На рисунку 10 показано часову діаграму для струму позитивного напрямку.

Умови для топології TNPC є аналогічними. T1 виявляє коротке замикання та плавно вимикається. Струм комутується до D3 та T2. Потім T2 жорстко вимикається при протіканні повного струму.

Пояснення щодо резисторів плавного вимкнення модулів дивіться в технічному описі плати драйвера [5, 6].

Цей захист реалізовано у зразку конструктивного виконання для модулів Semikron Danfoss SEMIX5 TNPC та NPC (рис. 11, 12). Використовуються два модулі SKYPER12, один для T1, T2, а інший для T3, T4. Обидва драйвери працюють у топології NPC. Це означає, що при виникненні помилки вимикається тільки драйвер, а не весь другий каскад плати драйвера [7, 8].

Захист від короткого замикання між фазами та між фазою і ланкою постійного струму

Для цього необхідно реалізувати алгоритм виявлення короткого замикання для зовнішніх та внутрішніх IGBT. У цьому випадку можна вчасно зреагувати на короткі замикання як у колах «фаза-фаза», «фаза-постійний струм», так і у колі «фаза-земля».

Якщо коротке замикання виявляють зовнішні IGBT, відключення модулів виконується, так, як описано вище. Якщо коротке замикання виявляють внутрішні IGBT, вони не вимикаються. Драйвер

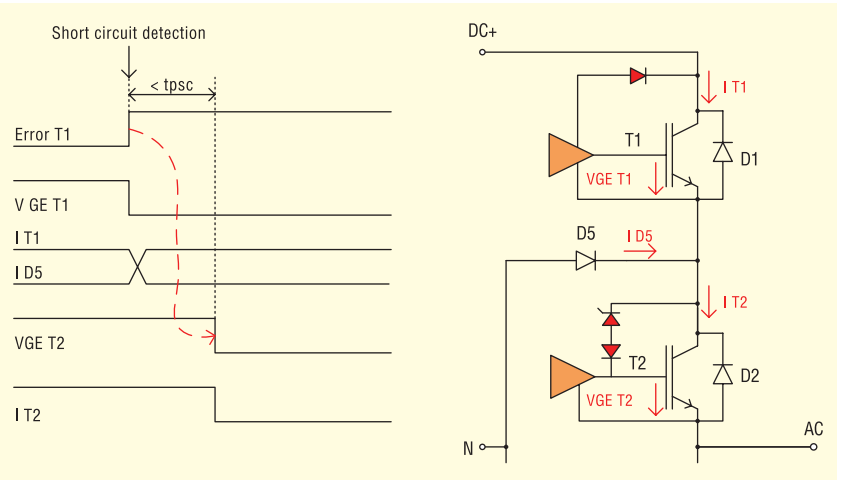

Рис. 10. Часова діаграма виявлення короткого замикання на зовнішньому IGBT

* Закінчення. Початок див. CHIP NEWS, № 9, 2025.

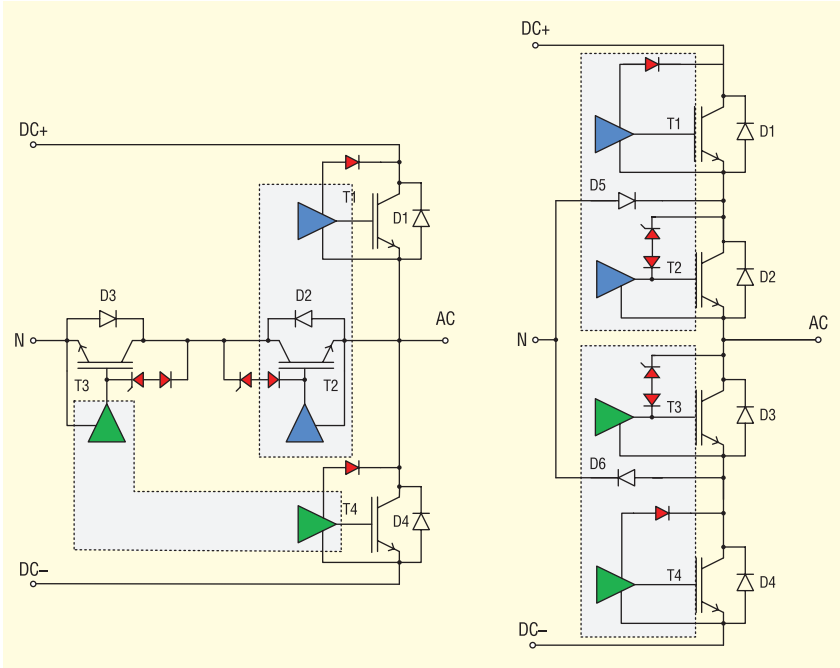

Рис. 11. **Схема плати драйвера Semikron Danfoss SEMiX®5. Зразок виконання для TNPC та NPC**

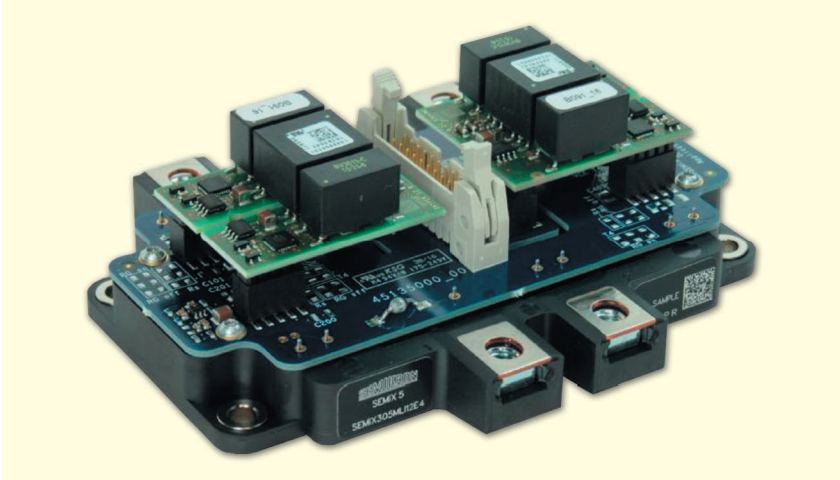

Рис. 12. **Зразок виконання модулів Semikron Danfoss «SEMiX®5 TNPC та NPC»**

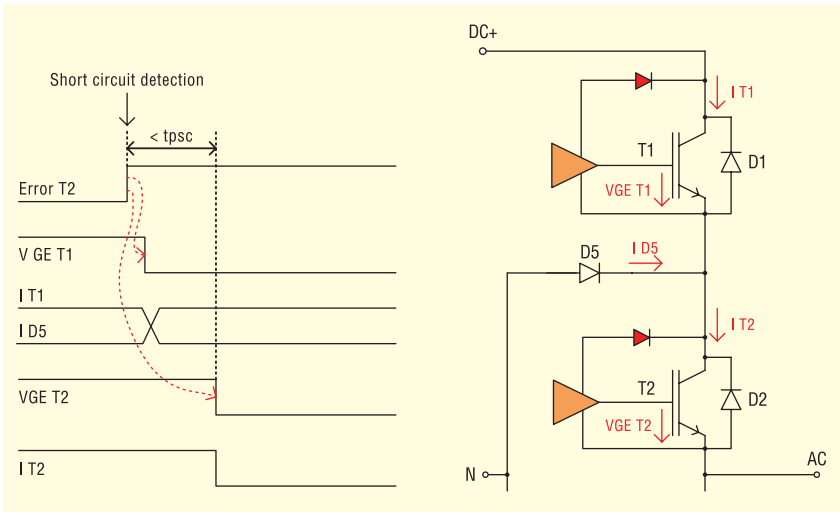

Рис. 13. **Часова діаграма виявлення короткого замикання на внутрішньому IGBT**

видає повідомлення про помилку. Після цього контролер на боці користувача вимикає зовнішні IGBT, якщо вони були ввімкнені. Після того, як струм від IGBT комутується до діодів D5/D6, внутрішні IGBT вимикаються. Послідовність вимкнення визначається платою керування. Таке вимкнення має відбутися впродовж часу tpsc. Зовнішні силові ключі вимикаються за допомогою стандартного резистора R_{goff}. На рисунку 13 показано часову діаграму для струму позитивного напрямку. Така послідовність вимкнення гарантовано виконується драйвером SKYPER42LJ у модулі NPC. У цьому режимі IGBT не вимикаються при виявленні короткого замикання, а лише передається сигнал помилки. Завдяки збереженому сигналу помилки IGBT вимикаються під час наступного імпульсу вимкнення за допомогою резистора м'якого вимкнення, і таким чином можуть бути захищені від перенапруги.

Цей захист реалізовано у зразку конструктивного виконання 2//SEMIX5 TNPC та NPC. Два модулі SEMIX5 з'єднані паралельно для отримання вихідної потужності приблизно 250 кВт. Використовуються два драйвери типу SKYPER42LJ. Драйвер можна встановити у 2-рівневий режим або режим MLI. Останній не потребує активних обмежувальних діодів завдяки достатньому запасу напруги, тоді як у режимі TMLI такі діоди застосовуються на внутрішніх IGBT.

Драйвер для внутрішніх IGBT працює в режимі NPC, а для зовнішніх IGBT — у дворівневому режимі. У разі короткого замикання IGBT вимикається через резистор м'якого вимкнення [9, 10].

Найкращий захист гарантується тоді, коли всі IGBT матимуть функцію виявлення короткого замикання та активне обмеження напруги. У цьому випадку кожен IGBT може бути негайно вимкнений у разі короткого замикання, не звертаючи уваги на певну послідовність перемикання. У разі появи сигналу про збій роботи одного IGBT, усі інші негайно вимикаються. Недоліком цієї схеми є велика кількість стабілітронів, що збільшує вартість і потребує додаткового місця на друкованій платі драйвера. Такий захист реалізовано у зразку конструктивного виконання для модулів SEMITRANS 10 NPC (рис. 14–16) [11].

СПЕЦІАЛЬНЕ НАЛАШТУВАННЯ ПЛАТИ ДРАЙВЕРА ДЛЯ 3-ГО РІВНЯ

Виявлення короткого замикання та вимкнення модулів через коротке за-

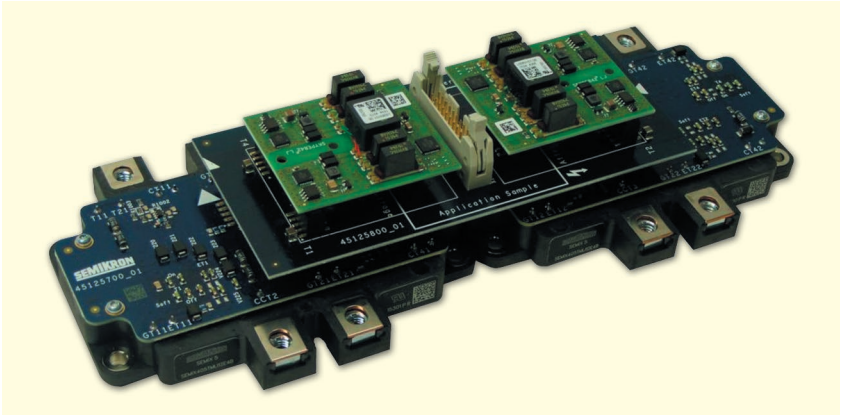

Рис. 14. Зразок застосування модулів Semikron Danfoss «2//SEMiX®5 TNPC та NPC»

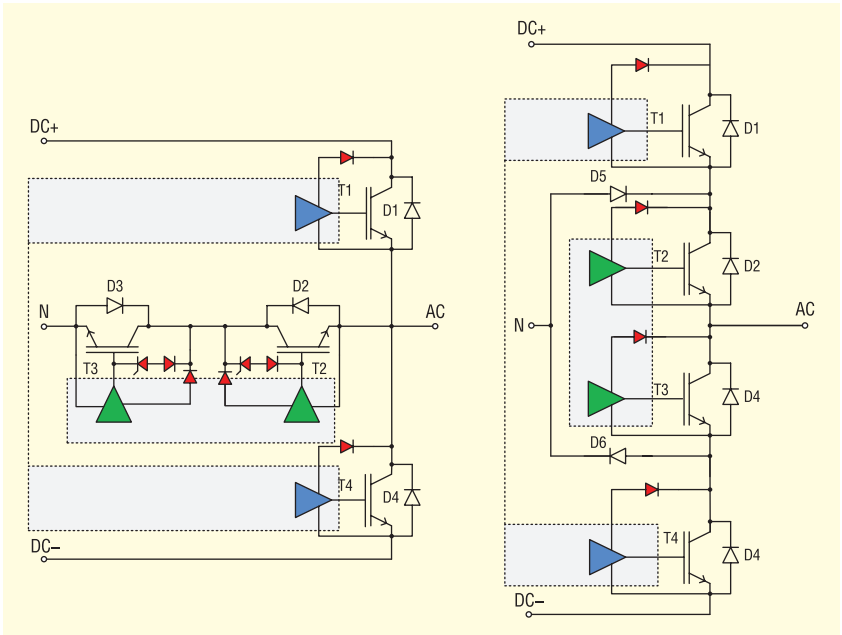

Рис. 15. Зразок застосування схеми плати драйвера «2//SEMiX®5 TNPC та NPC»

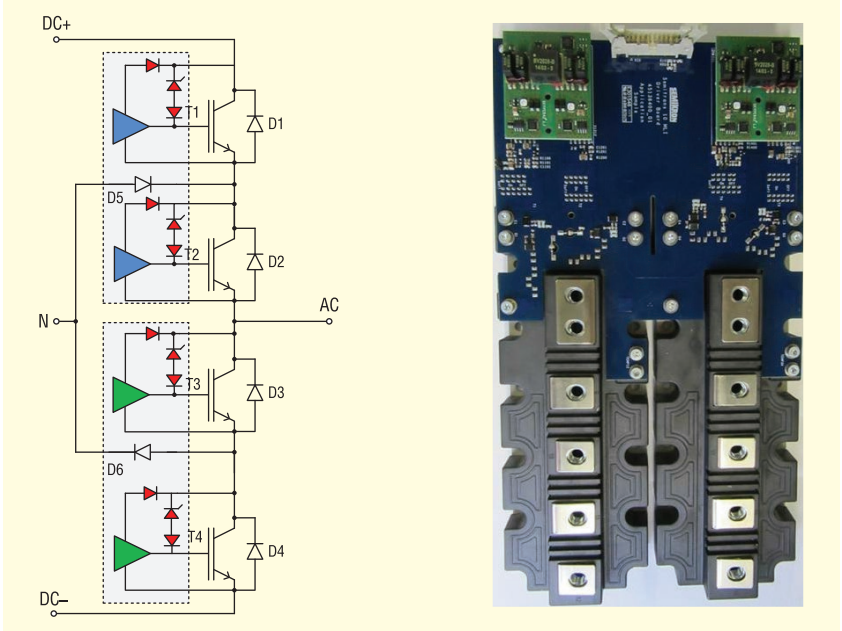

Рис. 16. Зразок конструктивного виконання для модулів SEMITRANS 10 NPC

микання складніше у модулях з NPC, ніж з TNPC. У випадку з TNPC лише один IGBT знаходиться в режимі провідності струму в момент короткого замикання, тоді як у випадку з NPC можуть бути увімкнені два IGBT, з'єднані послідовно. Під час використання IGBT одного типу обидва модулі можуть одночасно вийти зі стану насичення. Ця умова є небажаною, оскільки IGBT у ненасиченому стані мають високий коефіцієнт підсилення (велика зміна струму при малій зміні напруги на затворі) і тому можуть спричиняти генерацію коливань, що може призвести до руйнування цих модулів. Далі описані варіанти запобігання цьому:

- Випадок десатурації виключається, дозволяючи лише короткі замикання на виході інвертора, як описано раніше.
- Усі чотири IGBT мають активне обмеження напруги та функцію виявлення короткого замикання. Якщо виявляється коротке замикання, IGBT негайно вимикається, як описано раніше (рис. 16).
- Усі чотири IGBT мають функцію активного обмеження напруги, а виявлення короткого замикання є лише для зовнішніх силових ключів (рис. 17а). Крім того, внутрішні IGBT мають напругу затвора вищу, ніж у зовнішніх модулях (наприклад, 17 В). Так роблять для того, щоб зовнішні IGBT завжди виходили зі стану насичення першими. Недоліком є те, що при короткому замиканні на проміжку від змінного до постійного струму, в якому не задіяний зовнішній ключ, струм короткого замикання для внутрішніх IGBT стає дуже високим через вищу напругу на затворі. Тоді IGBT необхідно вимкнути раніше зазначеного вище часу короткого замикання tpsc, щоб уникнути руйнування модулів від перегріву.
- Усі чотири IGBT мають функцію активного обмеження напруги, проте виявлення короткого замикання є лише для внутрішніх ключів (рис. 17б). Крім того, зовнішні IGBT мають напругу затвора вищу, ніж у зовнішніх модулях (наприклад, 17 В). Так роблять для того, щоб внутрішні IGBT завжди виходили зі стану насичення першими. Отже, такий алгоритм роботи дозволяє виявити всі випадки короткого замикання. Якщо виявлено коротке замикання, IGBT негайно вимикається і генерується повідомлення про помилку. Після цього зовнішні IGBT негайно вимикаються. Схема активного обмеження амплітуди за-

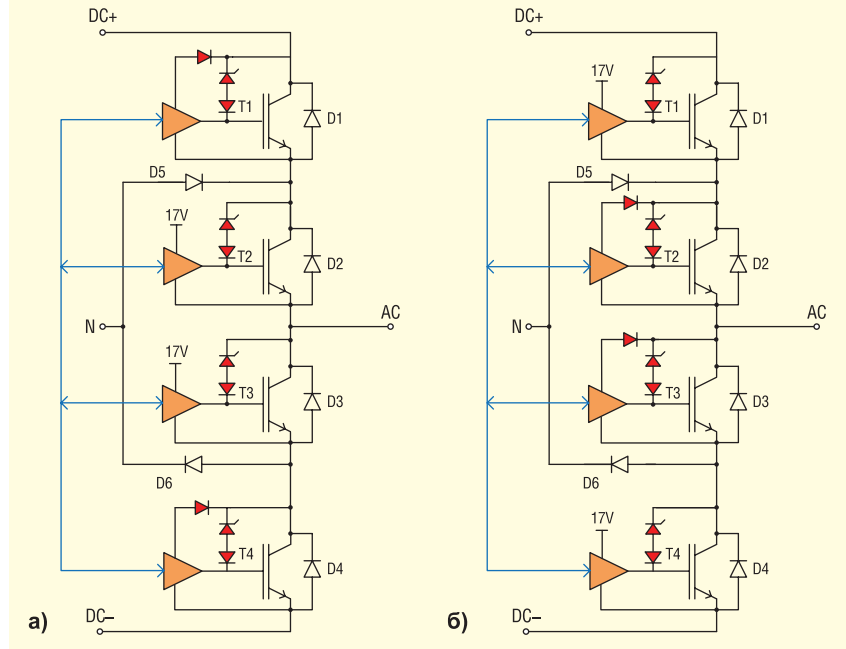

Рис. 17. Можливості виявлення короткого замикання для топології NPC з вищою напругою затвора

хищає IGBT від перенапруги, навіть якщо внутрішній IGBT вимикається раніше за зовнішній.

Іноді для забезпечення заданої послідовності вимкнення впроваджуються різні рівні виявлення короткого замикання V_{CE} та різні тривалості гасіння для внутрішніх і зовнішніх IGBT. Однак на практиці цей захід зазвичай не працює, оскільки допуски компонентів мають більший вплив, ніж регульована різниця в рівні виявлення V_{CE} та тривалості гасіння.

ВИСНОВКИ

Показано раціональну конфігурацію плати драйвера для обмеження пікової напруги та захисту від короткого замикання (SC) як для топології NPC, так і для TNPC. Для обмеження пікової напруги обидва зовнішні IGBT повинні вимикатися раніше за внутрішні.

Окрім врахування SC, обмеження пікової напруги шляхом активного її обмеження на внутрішніх IGBT може бути необхідним для схеми TNPC через нижчий запас напруги, а для схеми NPC — через вищу індуктивність у довгому комутаційному контурі.

На виникнення SC в топології TNPC простіше реагувати, оскільки проводить струм лише один IGBT. Топологію NPC складніше обробляти, оскільки два IGBT з'єднані послідовно, що може призвести до одночасного виходу зі стану насичення обох модулів.

При виявленні виходу з насичення лише зовнішніх IGBT можна зафіксувати тільки SC між фазами, але не SC між фазою та землею. Разом з тим це рішення є привабливим, оскільки трудомісткість та кількість компонентів відносно низькі, а також гарантована 3-рівнева послідовність безпечного вимкнення. Але все ж може знадобитися активне обмеження напруги на внутрішньому IGBT.

Для захисту від SC відносно землі та між фазами необхідно реалізувати виявлення виходу зі стану насичення на всіх IGBT. При різній напрузі на затворі внутрішнього та зовнішнього IGBT для схеми NPC достатньо виявлення виходу зі стану насичення лише на двох IGBT, оскільки послідовність такого виходу уже визначена. Завдяки наявності активних обмежувальних діодів на всіх IGBT, модулі можна вимкнути зразу після виявлення SC. Перевага полягає в тому, що не потрібно впроваджувати спеціальний режим вимикання, і можна використовувати стандартні дворівневі драйвери. Однак у такому разі потрібна велика кількість компонентів, особливо стабілітронів, що знижує надійність всієї системи. Крім того, проектування схеми активного обмеження амплітуди є складним через розкид у параметрах діодів.

Якщо струм SC може бути вимкнений датчиком струму на боці змінного струму до того, як IGBT вийде зі стану насичення, то виявлення десатурації на IGBT не потрібне. Зазвичай це відбувається тоді, коли швидкість наростання струму обмежена дроселем на боці змінного струму. Це значно зменшує вимоги до драйвера, враховуючи недолік щодо відсутності стійкості до SC на відрізку перед дроселем змінного струму, наприклад, через дефекти ізоляції або неправильне складання під час виробництва. Розробник системи повинен сам вирішити, який рівень захисту є достатнім для конкретних умов застосування.

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,
e-mail: sp.tsdrive@gmail.com,
semikron@ukr.net,
www.tsdrive.com.ua,
www.semismart.com.ua

Література:

1. www.semikron-danfoss.com
2. І. Рабл (I. Rabl), П. Бекедаль (P. Beckedahl), переклад: В. Павловський, редагування С. Поліщук. Топологія 3L NPC, TNPC та ANPC. CHIP NEWS № 6–8, 2025.
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. I. Rabl. TE — SEMiX5 1200V MLI SKYPER12 Driver Board. Rev. 04, SEMIKRON INTERNATIONAL GmbH 2019.
8. I. Rabl. TE — SEMiX5 TMLI SKYPER12 Driver Board. Rev 06, SEMIKRON INTERNATIONAL GmbH 2019.
9. I. Rabl. TE — SEMiX5 1200V TMLI Parallel Driver Kit. Rev 04, SEMIKRON INTERNATIONAL GmbH 2019.
10. I. Rabl. 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