

Польові тестування силових напівпровідникових модулів

**Пол Дрексхейдж (Paul Drexhage), Інго Рабл (Ingo Rabl),
Ульріх Ніколай (Ulrich Nicolai), 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**

Стаття висвітлює ключові методи польового тестування силових напівпровідникових модулів за допомогою цифрового мультиметра. Автори пояснюють, як правильно діагностувати діоди, тиристри, IGBT/MOSFET-модулі та інтелектуальні силові модулі, уникаючи поширених помилок. Матеріал стане корисною інструкцією для інженерів з ремонту та обслуговування електрообладнання в польових умовах.

МЕТА ТЕСТУВАННЯ

Силові напівпровідникові модулі упродовж свого терміну служби можуть бути підданими неодноразовим тестуванням. Оскільки вартість і складність тестування можуть бути високими, важливо розуміти, з якою метою тестують модуль. Неправильне тестування може призвести до бракування якісного модуля або, що ще гірше, до пошкодження справно-го модуля.

Тестування продукції у фірмі Semikron Danfoss

Кожен силовий напівпровідниковий компонент тестують для підтвердження його належного функціонування. Прямі (провідні) та зворотні (блокувальні) характеристики перевіряють за допомогою спеціального випробувального обладнання, здатного видавати номінальний струм і напругу для модуля (наприклад, сотні ампер і тисячі вольт). Для перевірки цілісності ізоляції між струмопровідними та заземленими частинами модуля (наприклад, клемми та базовою плитою) проводять спеціальні випробування високою напругою.

Вхідний контроль у виробника

Деякі клієнти намагаються провести електричні випробування компонентів одразу після їх надходження, перед встановленням в обладнання. Можливо, це було спричинене попередньою низькою якістю з боку постачальника або через переконання, що така перевірка призведе до зниження рівня браку готового продукту. На жаль, такі випробування часто проводяться за допомогою примітивного обладнання,

нездатного видавати високу напругу та струми, для яких дійсні паспортні технічні характеристики того чи іншого компонента схеми. У кращому випадку це призводить до безпідставного бракування компонентів, а в гіршому — до їх пошкодження. Набагато краще вирішувати проблеми якості з постачальником та впровадити процес виробничих випробувань, що передбачає функціональне тестування компонента без його випаювання зі схеми.

Пошук та усунення несправностей і тестування по принципу «справний/несправний» у польових умовах

Найбільш поширена ситуація — це коли обладнання вийшло з ладу в польових умовах і потребує відновлення. Компоненти силових напівпровідників необхідно перевірити, щоб визначити, чи потребують вони заміни, або чи безпечно повторно запускати обладнання. Щоб визначити, чи компонент справний, чи несправний, потрібен швидкий тест з використанням простого обладнання. Такий підхід і ліг в основу цієї статті.

ОБЛАДНАННЯ

Цифровий мультиметр з функцією перевірки діодів

Для належного тестування напівпровідника у польових умовах потрібен цифровий мультиметр (digital multimeter, DMM), який має функцію перевірки діодів. Ця функція позначається символом діода на перемикачі виду вимірів мультиметра або за допомогою додаткової кнопки на його корпусі. Мета цього тесту — перевірити, чи має діод великий опір в одному напрямку та чи проводить він струм (з невеликим падінням напруги) в іншому.

Прямий напрямок (стан провідності)

Ця функція перевірки діода працює шляхом прикладання невеликої напруги у прямому напрямку для переходу діода у ввімкнений стан та виміру падіння напруги на діоді під час протікання малого струму. Таке падіння напруги не є пороговою напругою (наприклад, V_{F0}), зазначеною в технічних характеристиках пристрою, яка натомість є частиною лінійної апроксимації характеристик діода в прямому напрямку, що використовуються для розрахунку втрат. Крім того, виміряне

падіння напруги з силовими діодами зазвичай менше, ніж очікувані 0.7 В, типові для кремнієвих діодів малої потужності (наприклад, 1N4148). Силові діоди в модулях на 600–1700 В зазвичай показують напругу від 0.2 до 0.5 В.

Зворотний напрямок (стан блокування)

Коли діод перебуває у зворотному (непровідному) напрямку, мультиметр повинен повідомляти про стан блокування діода. Зазвичай це позначається як «OL», «поза діапазоном», «розірване коло» або подібним чином. Оскільки цифровий мультиметр здатний подавати лише невелику напругу (наприклад, напруга внутрішньої батареї становить 9 В), цей тест не гарантує, що діод здатний блокувати свою номінальну напругу (зазвичай >600 В для силових напівпровідників).

Через невизначеність вимірів, описаних вище, метою перевірки діода є визначення того, чи перебуває діод в закороченому стані, чи повністю розірваний. У закороченому стані діоди показуватимуть «0 В» (або дуже низьке падіння напруги) в обох напрямках, тоді як діоди, що розірвані показуватимуть «OL» в обох напрямках.

Омметр

Користувачі часто намагаються використовувати омметр для вимірювання опору напівпровідників, щоб визначити стан їхнього «здоров'я». Хоча напівпровідник, який вийшов з ладу, може показувати опір у мегаомному діапазоні, а напівпровідник із коротким замиканням може показувати опір у міліомному діапазоні, ці показники будуть неправильними з таких причин.

По-перше, напівпровідникові прилади містять кремнієві області з різним легуванням (P-типу та N-типу), які утворюють PN-переходи. Ділянки, леговані фосфором та азотом, не є однорідними, а мають градієнти (профілі легування). Ці профілі є важливою частиною конструкції пристрою та є основним фактором у досягненні бажаних електричних властивостей. У силових напівпровідниках основні PN-переходи розраховані на роботу під напругою сотень (або тисяч) вольт. Напруга від цифрового мультиметра (наприклад, 9 В), за надто низька для створення потрібного електричного поля у PN-переході та на кінцевій структурі напівпровідника (область, яка знижує електричні поля на краю чипа). Це означає, що омметр вимірює лише обмежену частину профілю легування, і показання не відображають властивостей пристрою за робочих

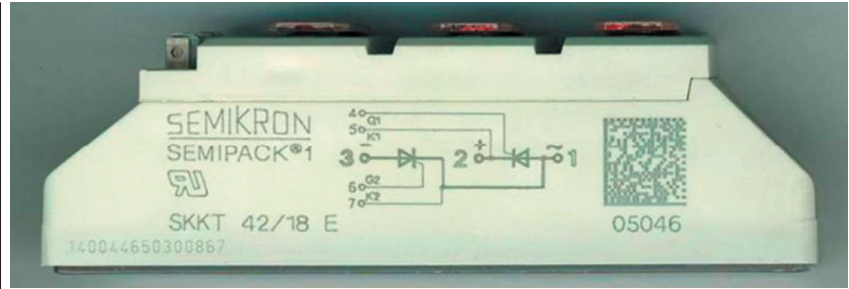


Рис. 1. Електрична принципова схема на боковій стороні SEMIPACK з показаними підключеннями до основних клем

умов. Більше того, оскільки PN-перехід має нелінійну вольт-амперну залежність, зміна напруги живлення в омметрі може призвести до різних показів для одного і того ж напівпровідника. У силових модулях електричний опір клем призводить до подальших відхилень у показках.

По-друге, щоб проводити вимірювання опору резисторів прямо у схемі, деякі цифрові омметри використовують дуже низьку напругу (наприклад, <0.6 В постійного струму), щоб уникнути прямого зміщення інших діодів або транзисторів, які можуть бути з'єднані паралельно з вимірюваним резистором. Це означає, що якщо омметр використовується для безпосереднього вимірювання стану діода, користувач, ймовірно, отримає хибні показники обриву електричного кола, оскільки вимірювач не подає достатньо напруги для переведення діода у відкритий стан.

Бувають випадки, коли омметр корисний для оцінки основних характеристик роботи транзистора (наприклад, заряджання затвора IGBT/MOSFET, див. далі), але точні значення опору не використовуються.

Вимірювачі опору на високій напрузі (наприклад, мегери, високовольтні мегомметри) призначені для перевірки якості ізоляції та можуть потенційно пошкодити напівпровідники.

ТЕСТУВАННЯ ДІОДНИХ/ТИРИСТОРНИХ МОДУЛІВ

Діоди та тиристри (біполярні пристрої) можуть бути мати одиночне або парне конструктивне виконання, а також складніше виконання (наприклад, трифазні мостові випрямлячі) в одному модулі. Для того, щоб визначити клемі для зовнішніх під'єднань слід використовувати технічні описи, щоб за один раз можна було вимірювати параметри лише одного пристрою. У таких модулях, як SEMIPACK та SEMITRANS, схеми та номери клем надруковані безпосередньо на боковій поверхні кожного модуля (рис. 1).

Усі вимірювання необхідно проводити після від'єднання модуля від схеми. Цифровий мультиметр потрібно перевести в режим перевірки діодів та дотримуватися полярності під'єднань.

Діод

Якщо позитивний (червоний) вивід під'єднано до анода, а негативний (чорний) — до катода, діод повинен проводити струм, а цифровий мультиметр повинен показувати падіння напруги в прямому напрямку (рис. 2).

Якщо негативний (чорний) провід мультиметра під'єднати до анода, а позитивний (червоний) провід до катода,

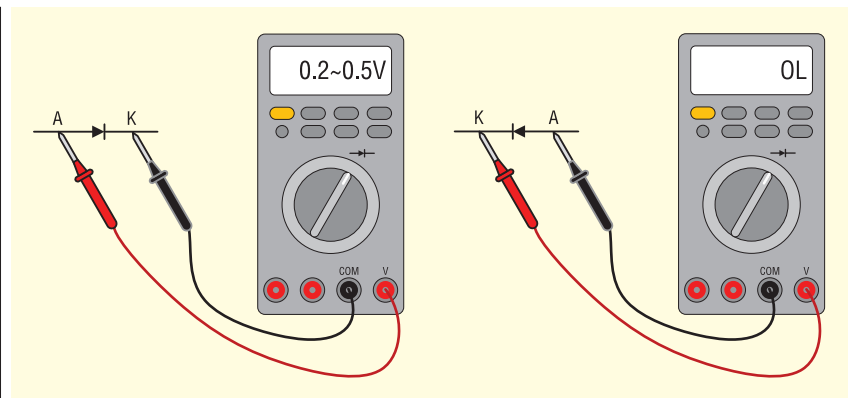


Рис. 2. Типові вимірювання прямого (зліва) та зворотного (справа) стану для справного діода

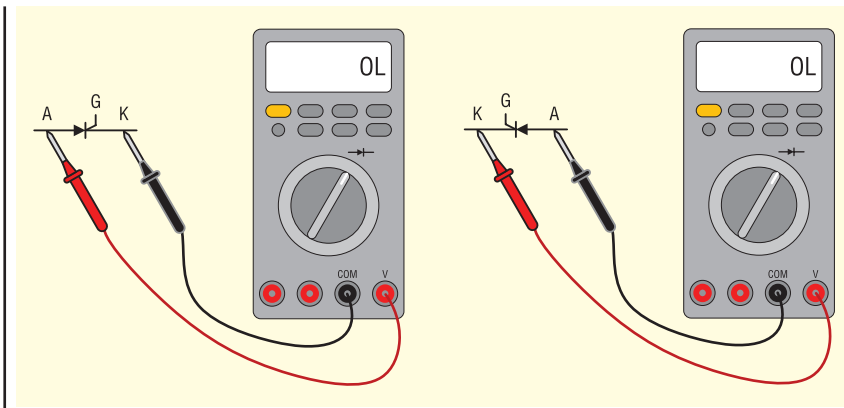


Рис. 3. Типові вимірювання прямого (зліва) та зворотного (справа) стану для справного тиристора

діод перейде у закритий стан, а цифровий мультиметр покаже розрив електричного кола (рис. 2).

Тиристор

Затвор тиристора під час випробувань слід залишати непід'єднаним.

Якщо позитивний (червоний) вивід під'єднано до анода, а негативний (чорний) — до катода, тиристор повинен перейти у закритий стан, а цифровий мультиметр повинен показувати розрив електричного кола (рис. 3).

З негативним (чорним) виводом на аноді та позитивним (червоним) виводом на катоді, тиристор також перейде у закритий стан, а цифровий мультиметр покаже розрив електричного кола (рис. 3).

Характеристики тиристорного затвора

Проміжок «затвор-катод» ідеального тиристора є PN-переходом. У багатьох тиристорах також роблять паралельний шлях для короткого замикання між затвором та анодом. Цей шлях призначений для забезпечення великого початкового струму, який допомагає запускати пристрій. Оскільки згаданий шлях складається з однорідного кремнію, який легований р-структурою, між затвором і катодом зазвичай існує опір 10~50 Ом, який можна виміряти мультиметром. Однак таке значення опору не є характеристикою тиристора, і наведено лише для того, щоб повідомити користувачу, що низький опір тут не вказує на пошкоджений пристрій.

При вимірюванні мультиметром за допомогою опції перевірки діодів з'єднання затвор-катод виглядатиме як низьке (але ненульове) падіння напруги (наприклад, 0.01~0.05 В) в обох напрямках (рис. 4).

ТЕСТУВАННЯ МОДУЛІВ IGBT/MOSFET

IGBT та MOSFET — це активні пристрої, для ввімкнення яких потрібно прикласти зовнішню напругу до затвора, тому падіння напруги на модулі у відкритому стані неможливо безпосередньо виміряти за допомогою цифрового мультиметра. Однак IGBT зазвичай оснащені інверсним діодом, який можна перевірити. МОП-транзистори мають вбудований у їх корпус діод, характеристики якого можна виміряти, а у випадку МОП-транзисторів з карбіду кремнію (SiC) вони можуть мати додатковий діод, увімкнений паралельно (рис. 5).

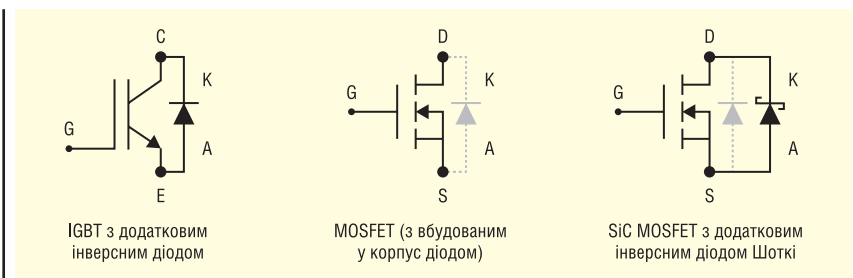


Рис. 5. Розташування клем та діодів для IGBT та MOSFET

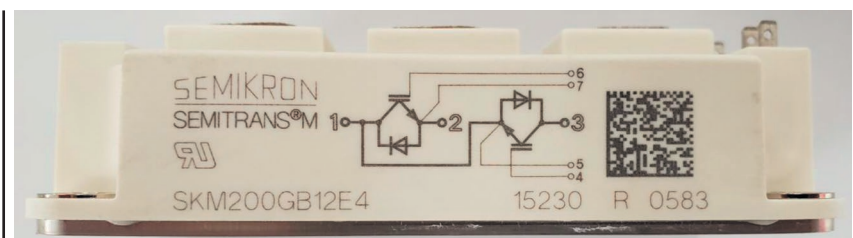


Рис. 6. Електрична схема, надрукована на модулі SEMITRANS 3 із показаними підключеннями до основних клем

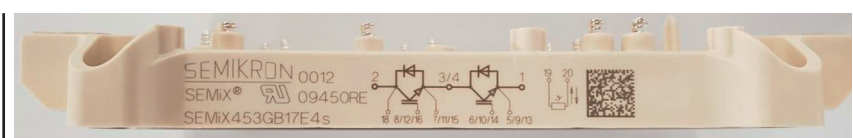


Рис. 7. Типові вимірювання прямого (L) та зворотного (R) стану для справного IGBT

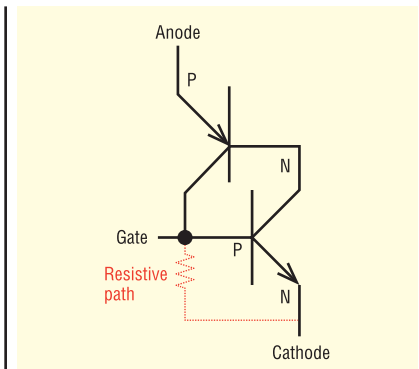


Рис. 4. Опір між затвором і катодом у тиристорі

Як і у біполярних модулях, у модулях IGBT/MOSFET їх схеми також надруковані на боковій поверхні кожного модуля, і можуть допомогти визначити, до яких клем під'єднати проводи вимірювача (рис. 6).

Інші модулі можуть мати дві клеми, що під'єднані до однієї точки всередині модуля, наприклад, клеми змінного струму на корпусі SEMiX (рис. 7). Допоміжні з'єднання (емітер або катод) можуть бути продубльовані на менших клемах для під'єднання до драйвера.

Прямі та зворотні характеристики

Усі виміри слід проводити з відключеним від схеми модулем. Цифровий

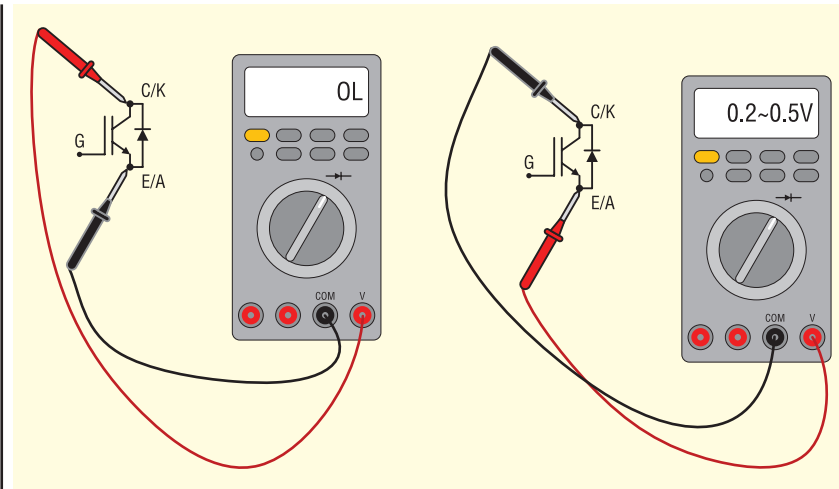


Рис. 8. Типові вимірювання прямого (зліва) та зворотного (справа) стану для справного IGBT

мультиметр слід перевести в режим перевірки діодів та дотримуватися правильної полярності під'єднань.

З позитивним (червоним) виводом на колекторі (С) та негативним (чорним) виводом на емітері цифровий мультиметр повинен показувати розрив електричного кола (рис. 8).

Якщо позитивний (червоний) вивід знаходиться на емітері (Е), а негативний (чорний) вивід — на колекторі (С), діод повинен знаходитися у стані провідності, а цифровий мультиметр повинен показувати подвійня напруги в прямому напрямку (рис. 8).

Характеристики затвора

Перехід затвор-емітер (затвор-вистік) IGBT (MOSFET) працює як конденсатор завдяки своїй ізолюваній конструкції. З урахуванням цього факту цифровий мультиметр можна використовувати як омметр, але лише для заряджання затвора, а не для вимірів опору кола затвора.

Оксидний шар, що утворює ізоляцію затворної структури, дуже тонкий і тому не захищений від деструктивної дії електростатичного розряду (electrostatic discharge, ESD). Слід бути обережним, і не торкатися затвора без належних заходів захисту від електростатичного розряду.

Усі виміри слід проводити з відключеним від схеми модулем. Цифровий мультиметр слід перевести в режим омметра.

Якщо один позитивний або негативний вивід знаходиться на затворі, а інший — на емітері (витоку), вимірювач повинен показувати швидке зростання опору, що перевищує мегаомний діапазон. Більшість вимірювачів повинні

показувати розрив електричного кола (OL). Це показує, що вимірювач заряджає ємність, а показаний вимірювачем опір характеризує вольт-амперну характеристику. Зі зменшенням струму у процесі заряджання конденсатора опір прямує до нескінченності.

Пошкоджений затвор зазвичай показує коротке замикання (наприклад, 0 Ом) з емітером (витоком) або з колектором (стоком).

ТЕСТУВАННЯ МОДУЛІВ IPM ТА ДРАЙВЕРІВ ЗАТВОРА

Інтелектуальні силові модулі (*Intelligent Power Modules, IPM*) містять кілька IGBT разом із драйвером (і радіатором, у випадку SKiiP). Перевірка IGBT в IPM аналогічна перевірці дискретних модулів, хоча в IPM спочатку необхідно визначити топологію схеми та підключення драйвера. Додаткові компоненти на платі драйвера, під'єднані паралельно з IGBT, можуть спотворювати результати вимірів.

Силова база

Для модуля IPM, такого як SKiiP, силова база складається з кількох каскадів, кожен з яких містить напівміст на IGBT. Залежно від типу SKiiP, ці каскади можуть працювати окремо (тип GD) або паралельно (тип GB). У модуль типу GB паралельне під'єднання силових клем виконується зовні модулів (за допомогою шин), тому кожен каскад необхідно перевіряти окремо (рис. 9).

Драйвери затвора

Через складні схеми драйверів затворів нелегко визначити, які конкретні компоненти вийшли з ладу. На щастя,

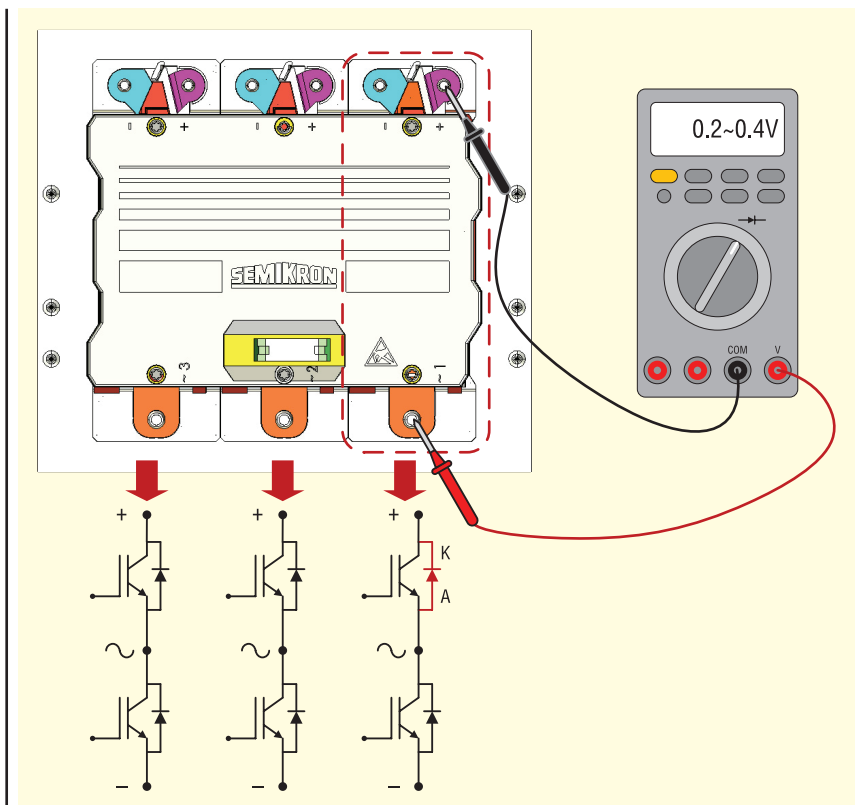


Рис. 9. Перевірка верхнього зворотного діода у першому каскаді рикаскадного SKiiP. Зверніть увагу, що окремі каскади не з'єднані один з одним на силових клеммах

I_{S0}	bias current @ $V_S = 24\text{ V}$, $f_{SW} = 0$, $I_{AC} = 0$	240	mA
----------	--	-----	----

Рис. 10. Приклад струму зміщення (з технічного опису SKiIP)

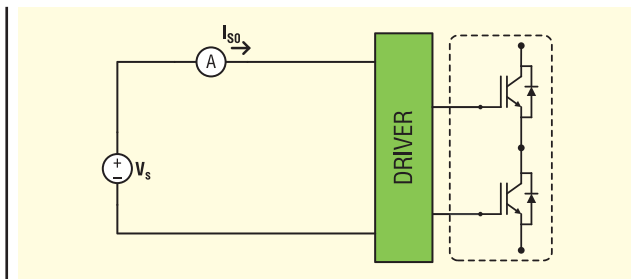


Рис. 11. Схема вимірів драйверного струму зміщення

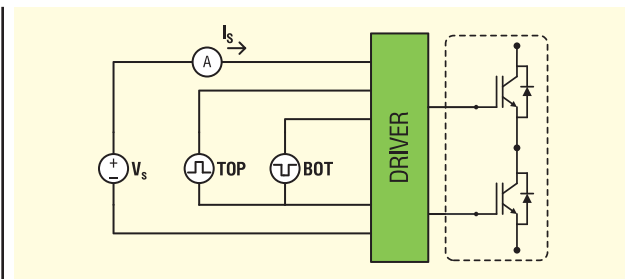


Рис. 13. Виміри струму перемикання

I_S	$k_1 = 29\text{ mA/kHz}$, $k_2 = 0.00065\text{ mA/A}^2$	$= 240$	$+ k_1 * f_{SW}$	$+ k_2 * I_{AC}^2$	mA
-------	--	---------	------------------	--------------------	----

Рис. 12. Приклад струму комутації (з технічного опису SKiIP)

для модулів IPM та дискретних драйверних схем було встановлено, що струм, що споживається від джерела живлення, зазвичай є добрим показником того, чи справний драйвер затвора, чи ні. Можна перевірити два види споживаного драйвером струму: струм спокою (некомутаційний) та струм під час комутації IGBT.

Цей процес потребує джерела живлення з регульованою напругою, амперметра для вимірювання струму від джерела живлення та методу подачі комплементарного сигналу керування верхнім та нижнім драйверами та на фіксованій частоті. Рекомендується встановити спеціальне випробувальне обладнання, якщо тестування проводяться регулярно або у великій кількості. Деякі компанії виробляють обладнання, що об'єднує джерело живлення, сигнали керування драйверами та точки вимірювання в одному портативному корпусі [3].

Вхідні контакти схем драйверів також можуть бути чутливими до електростатичного розряду (ESD). Будьте обережні та не торкайтеся плат драйверів без належних запобіжних заходів проти електростатичного розряду.

Струм зміщення

Струм живлення за відсутності перемикань можна знайти в технічному описі пристрою (рис. 10) для заданої вхідної напруги (наприклад, I_{S0}).

Струм зміщення можна перевірити, під'єднавши регульоване (лабораторне) джерело живлення з послідовно увімкненим амперметром (рис. 11) та перевіряючи струм, споживаний драйвером, коли він знаходиться в режимі очікування. Не слід застосовувати високу напругу (наприклад, напругу ланки постійного струму).

Струм перемикання

Також у технічному описі драйвера (рис. 12) вказано струм, що споживається під час перемикання драйвера затвора (наприклад, I_S). Для модулів IPM це значення може також враховувати струм, споживаний датчиками струму, тому очікуваний струм необхідно розраховувати за спеціальною формулою.

Як і у вищевказаних прикладах, застосовується регульоване джерело постійного струму з амперметром. Крім того, для верхнього та нижнього затворів потрібен сигнал увімкнення/вимкнення (прямокутна хвиля). Верхній та нижній силові ключі керуються комплементарно з фіксованою частотою перемикання. Тривалість робочого циклу не має значення (рис. 13).

Використовуючи приклад з рисунка 12, за умови подачі напруги 24 В постійного струму та сигналу перемикання ключів частотою 10 кГц, слід очікувати споживання струму силою 530 мА. Без перемикання ключів у модулі IPM споживатиметься лише струм зміщення силою 240 мА. Якби перемикався лише один IGBT (верхній або нижній), очікувався б споживаний струм від 240 мА до 530 мА.

Індикація сигналів помилок

В рамках будь-якого усунення несправностей слід перевірити драйвер, щоб визначити, чи генеруються які-небудь сигнали помилок. Зазвичай, драйвер, що підключений до модуля IGBT, до якого подається лише живлення керування, не повинен генерувати жодних сигналів помилок (наприклад, зниженої напруги, DESAT тощо). Однак, оскільки

драйвери часто не мають можливості самодіагностики, можлива ситуація, коли драйвер може бути несправним і не сигналізувати про помилку.

ВИСНОВКИ

Силові напівпровідники — це складні пристрої, які неможливо повністю оцінити без спеціального обладнання. Однак цифровий мультиметр з функцією перевірки діодів дозволяє швидко перевіряти силові модулі на справність/несправність для ситуацій, що охоплюють більшість, які можуть виникнути в польових умовах.

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,
www.tsdrive.com.ua,
www.semismart.com.ua**

Література:

1. www.semikron-danfoss.com
2. A. Wintrich, U. Nicolai, W. Tursky, T. Reimann, «Application Manual Power Semiconductors», 2nd edition, ISLE Verlag 2015, ISBN 978-3-938843-83-3.
3. Ingenieurbüro Billmann. Lerchensteige 10, 91448 Emskirchen, Germany. www.ib-billmann.de