

# Вимірювання пікової напруги модулів IGBT і вимоги до демпферного конденсатора

Переклад та редагування: Володимир Павловський, к.т.н, с.н.с.,  
Інститут електродинаміки (ІЕД) НАН України

**Дана стаття є керівництвом із застосування модулів IGBT та містить інформацію про те, як вибрати та перевірити демпферні конденсатори для модулів IGBT у системах великої потужності та як перевірити ефективність їхньої роботи. Ця інформація допоможе запобігти виходу з ладу модуля IGBT та/або демпферного конденсатора від електричного або теплового перевантаження. Інформація, наведена в цьому керівництві, містить також поради щодо того, які параметри демпферного конденсатора слід враховувати та як виконати необхідні вимірювання.**

## ВСТУП

Якщо великі струми комутувати дуже швидко, то виникають перенапруги, які можуть зруйнувати силовий напівпровідниковий ключ. Ці перенапруги спричинені енергією, накопиченою в магнітному полі навколо провідника зі струмом (наприклад, у колах постійного струму). Амплітуда перенапруги залежить від паразитної індуктивності або індуктивності виводів  $L_s$  ( $E = 0.5 \cdot L_s \cdot i^2$ ). Перенапруга ( $V = L_s \cdot di/dt$ ) може перевищувати максимально допустиме значення напруги для силового модуля ( $V_{CES}$ ,  $V_{RRM}$ ...), оскільки вона додається до напруги постійного струму. Першим контрзаходом є забезпечення низької індуктивності монтажу для схеми постійного струму, щоб уникнути перенапруг на силовому модулі. Це досягається використанням ламінованої системи шин («сандвіч» із металевих шин +DC, -DC

та ізоляційного шару між ними), і застосуванням якомога коротших з'єднань між джерелом напруги (конденсатором у схемі постійного струму) та силовим модулем. Крім того, рекомендується додати у схему демпферні конденсатори, які слід монтувати безпосередньо на клемах підключення напруги постійного струму у кожному модулі IGBT. Цей демпфер працює як фільтр низьких частот і «бере на себе» імпульсне перевищення напруги. На рисунку 1 показані типові конструкції демпферних конденсаторів.

На рисунку 2 показані осцилограми напруги на IGBT під час вимкнення з демпферним конденсатором і без нього. З розгляду рисунку 2 можна чітко побачити ефект зменшення сплесків напруги.

На рисунку 3 показана еквівалентна схема з паразитними індуктивностями.

Щоб вирішити, чи потрібен демпферний конденсатор, слід перевірити амплітуду напруги колектор-емітер ( $V_{CEpeak}$ ) модуля IGBT для найважчих умов експлуатації, щоб переконатися, що  $V_{CES}$  не буде перевищено за будь-яких робочих умов. У разі необхідності, вибираючи для застосування демпферний конденсатор, слід враховувати кілька аспектів:

- клас напруги постійного струму для конденсатора;
- значення ємності конденсатора та індуктивності його виводів;

- можливість нормальної роботи в умовах дії імпульсної напруги;
- діючі значення напруги на конденсаторі та струму через нього;
- термін служби.

## ПАРАМЕТРИ КОНДЕНСАТОРА

### Клас по напрузі постійного струму

Для досягнення очікуваного терміну служби максимальна напруга постійного струму, прикладена до силового модуля, не повинна перевищувати номінальну напругу постійного струму, наведену в технічному паспорті на модуль. Силові модулі з напругою запирання 1200 В використовуються у колах постійного струму з напругою до 900 В. Для цих застосувань рекомендуються конденсатори з номінальною напругою 1000 В. Для модулів на 1700 В залежно від напруги у колах постійного струму рекомендуються конденсатори на напругу 1250 або 1600 В.

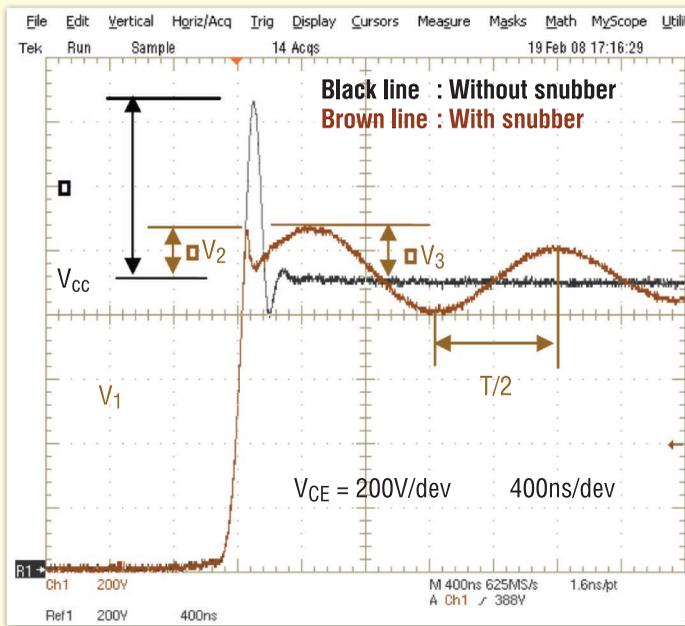
Максимальне значення прикладеної до конденсатора напруги також має бути в межах допустимих норм, інакше пластикова плівка-ізолятор всередині конденсатора може бути пошкоджена. Допустима амплітуда напруги наведена в технічних характеристиках або потребує додаткового запиту. Враховуйте також, що прикладена напруга постійного струму повинна бути зменшеною, коли конденсатор працює при температурах, вищих за номінальну.

### Ємність конденсатора та індуктивність його виводів

Значення ємності має бути достатньо високим, щоб досягти достатнього зменшення стрибків напруги під час вимкнення модуля. Типові значення для цих конденсаторів складають від 0.1



**Рис. 1. Демпферні конденсатори з низькою індуктивністю для монтажу на модулях IGBT**



$$\Delta V_1 = \Sigma L \cdot di_c / dt$$

$$\Delta V_2 = (L_C + L_E + L_{Snubber}) \cdot di_c / dt$$

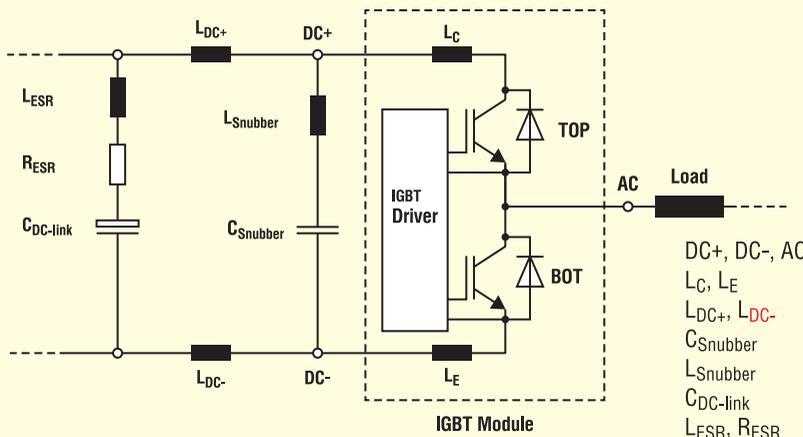
$$\Delta V_3 = \sqrt{\frac{L_{DC-Link} \cdot i_c^2}{C_{Snubber}}}$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_{DC-Link} \cdot C_{Snubber}}}$$

$$\Sigma L = L_C + L_E + L_{DC+} + L_{DC-} + L_{ESR}$$

$$L_{DC-Link} = L_{DC+} + L_{DC-} + L_{ESR}$$

**Рис. 2.** Типова форма напруги VCE модуля IGBT під час вимкнення (чорна лінія – без демпферного конденсатора; коричнева лінія – з демпферним конденсатором)



- DC+, DC-, AC IGBT module terminals
- L<sub>C</sub>, L<sub>E</sub> IGBT module parasitic inductance
- L<sub>DC+</sub>, L<sub>DC-</sub> Bus bar parasitic inductance
- C<sub>Snubber</sub> Snubber capacitor capacitance
- L<sub>Snubber</sub> Snubber capacitor series inductance
- C<sub>DC-link</sub> DC-link capacitor capacitance
- L<sub>ESR</sub>, R<sub>ESR</sub> DC-link capacitor parasitics

**Рис. 3.** Еквівалентна схема для модуля IGBT, підключеного до схеми електроживлення постійного струму та демпферного конденсатора

до 1.0 мкФ. Але для зменшення стрибків напруги важливе не тільки значення ємності. Також важливо, щоб внутрішня конструкція конденсатора мала низьку індуктивність. Залишкова індуктивність, яка спричинена петлею між клемми та внутрішніми з'єднаннями конденсаторів, визначає перший стрибок напруги  $V_2$ , показаний на рисунку 2. Велика ємність конденсатора не є гарантією незначного стрибка напруги, якщо результуюча індуктивність виводів конденсатора залишається достатньо великою.

Низька власна індуктивність може бути досягнута за допомогою конденсаторів із широкими плоскими виводами, які можна пригвинчувати безпосередньо до контактів IGBT модуля. Конденсатор

має бути сконструйований так, щоб клемми охоплювали якомога меншу площу і щоб вони були безпосередньо підключені до внутрішньої частини конденсатора без додаткових проводів між ними (рис. 1).

Правильний вибір демпферного конденсатора повинен визначатися результатами вимірювань. Крім того, конденсатори з металізованою поліпропіленовою фольгою слід використовувати з пластиковим корпусом відповідно до стандарту UL94V-0.

**Робота в імпульсному режимі**

Внутрішні з'єднання конденсатора здатні витримувати лише обмежену кількість енергії при кожному перемиканні

модуля. У паспорті даних виробника вказані обмеження для імпульсної роботи як значення  $i^2t$  або  $v^2t$ . Ці значення можна розрахувати, маючи осцилограму струму через конденсатор або напруги на виводах конденсатора. Такий розрахунок можна легко провести за допомогою сучасних цифрових осцилографів.

Відмова конденсатора може виникнути через імпульси струму великої амплітуди, навіть якщо робоча напруга нижча за паспортну. У цій ситуації критичним фактором є енергія, яка виділяється всередині конденсатора, і звичай вона спричиняє розрив між напиленим металом та металізованою плівкою всередині конденсатора. Через дуже високу виділену енергію ме-

талізація плівки буде випаровуватися в зоні з'єднання з металевим спреєм. Це призведе до збільшення втрат у конденсаторі або навіть до втрати його ємності. Максимальні значення  $dv/dt$  менш критичні через те, що напруга на конденсаторі має форму загасаючої синусоїди.

### Діючі значення напруги на конденсаторі та струму через нього

Згасаючі коливання виникають при кожному перемиканні (увімкнення або вимкнення = подвоєна частота перемикання IGBT) між демпферним конденсатором і ємністю шини електроживлення. Максимальне значення напруги  $V_s$ , для незагасаючих коливань і її частоту можна розрахувати за формулою на рисунку 2. Спричинений напругою струм призводить до саморозігрівання конденсатора. Нагрів стабілізується при певній температурі, яка також залежить від температури навколишнього середовища та умов монтажу (наприклад, температури контактів силового модуля). У специфікаціях на силовий модуль наведені значення допустимих діючих значень струму та напруги залежно від частоти. Частота коливань залежить від паразитної індуктивності кола постійного струму та ємності демпферного конденсатора. Типові значення знаходяться в діапазоні від 100 кГц до 1 МГц. Допустиме діюче значення струму зменшується зі збільшенням частоти, оскільки збільшуються втрати. Перегляньте розділ «Вимірювання діючого значення струму конденсатора», який містить поради щодо практичного вимірювання струму через конденсатор.

### Термін служби

На термін служби конденсатора та частоту його відмов головним чином впливають робоча температура та робоча напруга на конденсаторі. Критерії відмови також можуть змінюватись залежно від конкретного постачальника. Перевірте специфікацію та керівництво із застосування щодо терміну служби силового модуля та дані про частоту його відмов.

### Самовідновлення

Найважливішою характеристикою надійності плівкових конденсаторів є їх властивість самовідновлення, тобто автоматичного усунення дефекту в діелектрику. Після цього конденсатор можна використовувати без будь-яких обмежень. Цей дефект виникає, коли

напруженість поля локально перевищується в слабкій точці фольги аж до діелектричного пробою.

## ВИМІРЮВАННЯ ТА ПЕРЕВІРКА

### Перенапруги на модулях IGBT ( $V_{CEpeak}$ )

Ні в якому разі не можна перевищувати максимальне значення  $V_{CES}$ . Тому потрібно провести вимірювання, щоб визначити максимальне значення  $V_{CE}$  (також позначається як  $V_{CEpeak}$ ), яке може виникнути під час роботи силового модуля. Вимірювання мають засвідчити, що сам силовий модуль, плата драйвера (резистори затвора), схема постійного струму та демпферний конденсатор працюють без перевищення напруги  $V_{CEpeak}$ . Пропонується дослідити наступні чотири умови роботи модуля:

- Максимальну амплітуду робочого струму.
- Перевищення струму (OCP) і коротке замикання (КЗ).

**Примітка:** під час роботи модуля можуть виникати різні КЗ, наприклад на навантаженні, на кабелях до навантаження або всередині обладнання поблизу модуля IGBT. Типові значення індуктивності КЗ:  $L > 10$  мкГн для КЗ у навантаженні та  $L < 1$  мкГн для КЗ в інших точках схеми. Причиною може бути надто короткий кабель або надто жорстке з'єднання. Випробування слід починати від більших індуктивностей до найменших. Найбільше перевищення напруги зазвичай відбувається, коли IGBT вмикається безпосередньо перед виходом зі стану насичення. Це має місце при малих індуктивностях короткого замикання, коли схема керування вмикає IGBT після виявлення нею перевантаження по струму безпосередньо перед тим, як відбувається вихід модуля зі стану насичення. Випробування слід проводити при низькій і високій температурі  $p-n$ -переходу IGBT.

- КЗ у одній стійці моста (не застосовується для модулів SKiIP і драйверів з функцією блокування). Примітка: верхній і нижній IGBT вмикаються одночасно. У цьому випадку відбувається вихід модуля зі стану насичення; це має бути виявленим та усунути драйвером впродовж часу, зазначеного у специфікації на IGBT. Можна досліджувати різні випадки:
  - верхній і нижній IGBT вмикаються одночасно;

- верхній IGBT вже включений і проводить струм, коли нижній IGBT вмикається (і навпаки);
- Діод вимкнений.
 

**Примітка:** під час вимкнення діода можуть виникнути стрибки напруги, що може призвести до високої напруги запирання на діоді та паралельно підключеному IGBT. Найгірший випадок буває здебільшого при малому струмі ( $< 10\% \cdot I_C$ ) та високій температурі. Напругу слід вимірювати на діоді, який вмикається, або на паралельно підключеному IGBT. Іноді демпферний конденсатор більш необхідний для вимкнення діода, ніж для вимикання IGBT. Занадто швидке перемикання діодів також може спричинити сплески напруги, якщо IGBT ще не повністю увійшов у стан насичення.

Напругу запирання слід вимірювати якомога ближче до чипа IGBT. Для модулів SKiIP найближчі точки — це силові клеми модуля. Для окремих модулів живлення, таких як SEMiX та SEMITRANS додаткові контакти емітера електрично розташовані ближче до чипа. Щоб одержати реальну напругу запирання безпосередньо на чипі IGBT, до вимірювання значення повинні бути додані напруги на паразитних індуктивностях внутрішнього модуля між точкою вимірювання та чипом IGBT. Практичний підхід для більшості застосувань полягає у виконанні так званого «тесту подвійного імпульсу» (рис. 4). Задаючи різні значення індуктивності навантаження та тривалості імпульсу, можна регулювати ступінь навантаження від низького до перевантаження. Для перевірки стану КЗ слід використовувати одноімпульсний тест з обмеженою тривалістю імпульсу. У цих тестах драйвер отримує вхідний сигнал від генератора імпульсів, а не від плати керування.

### Процедура вимірювання:

- Ланка постійного струму живиться від ізолюваного джерела постійної напруги, вихідний струм якого обмежений. Зазвичай струм складає кілька сот мА. Тому встановіть напругу постійного струму на найвище можливе значення. Зазвичай це поріг спрацювання захисту від перенапруги.
- Режим КЗ реалізують за допомогою перемички з товстого кабелю від позитивного полюса постійного струму до виводу змінного струму (для вимірювання на нижньому IGBT, рис. 5)), або від негативного полюса постійного струму до виводу змінного струму (для вимірювання на верхньому IGBT, рис. 6). Ін-

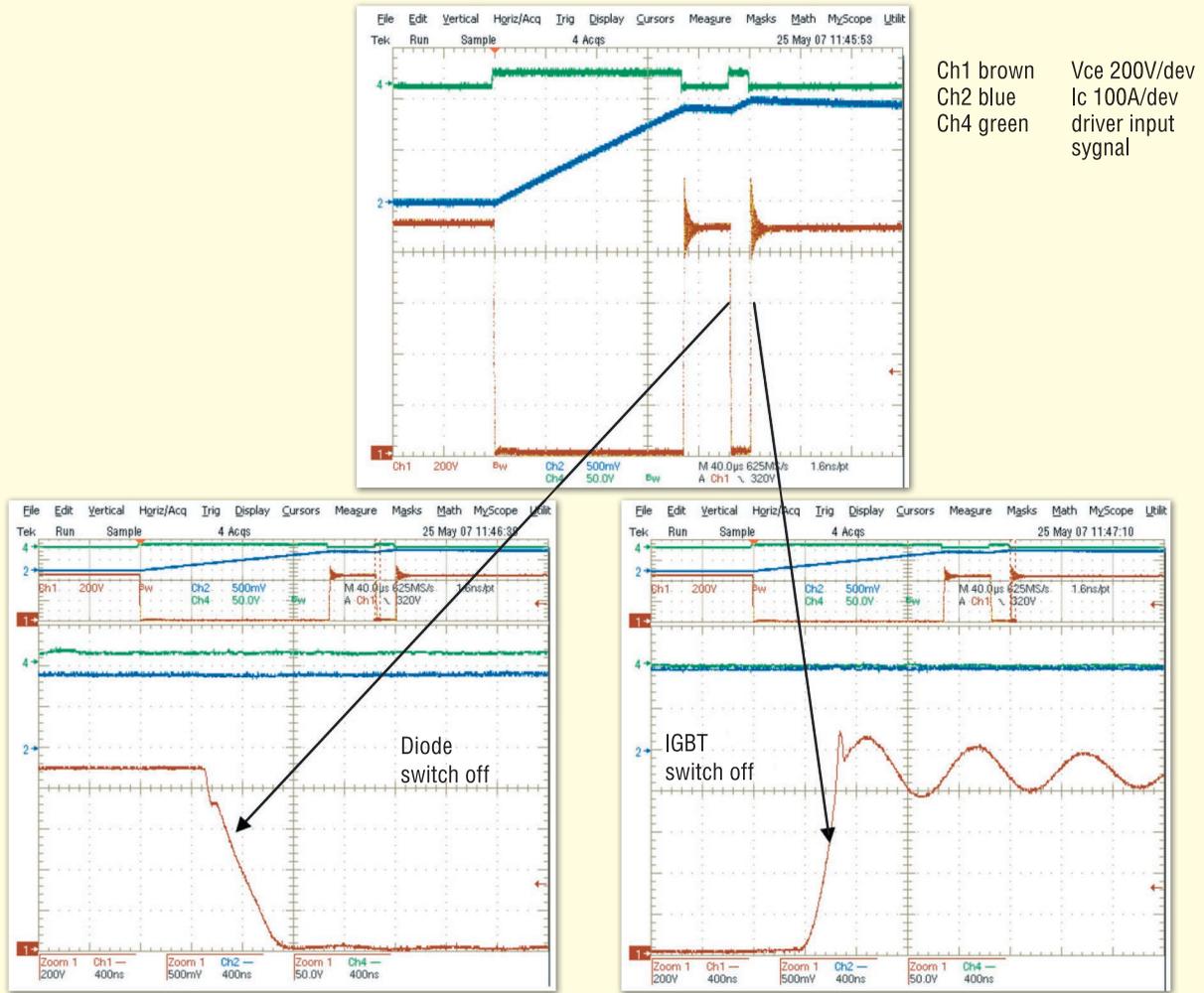


Рис. 4. Типові осцилограми подвійного імпульсу

дуктивність визначається довжиною дроту; 1  $\mu\text{H}$  відповідає приблизно 1 м довжини. Коротке замикання також може бути відтворене перемичкою з дроту між двома контактами змінного струму на двох різних стійках інверторного мосту. Один IGBT (наприклад, верхній у фазі L1) має бути постійно увімкненим, поки імпульс подається на інший IGBT (наприклад, нижній у фазі L2).

- На вхід драйвера підключають генератор імпульсів з регульованою тривалістю імпульсу. Генератор імпульсів може бути налаштований на одиничний або подвійний імпульс.
- Якщо захист від перевантаження по струму (*Over Current Protection, OCP*) виконує плата керування, а не драйвер, тоді слід контролювати сигнал помилки OCP з плати керування, щоб знайти точку, коли вхідний сигнал буде вимкнено. Для модулів SKiIP це не потрібно, оскільки режим OCP реалізовано на платі драйвера.

- Почніть з найбільшої індуктивності. Працюйте в режимі одиничного імпульсу і збільшуйте тривалість

імпульсу, поки не спрацює OCP. Виміряйте максимальне значення напруги  $V_{CE}$ .

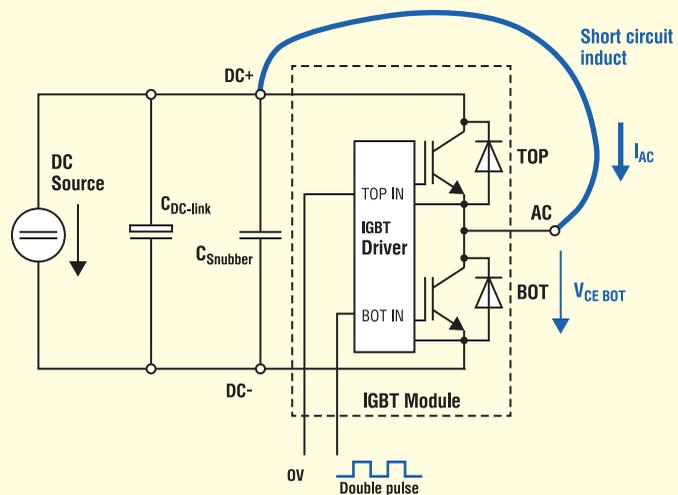
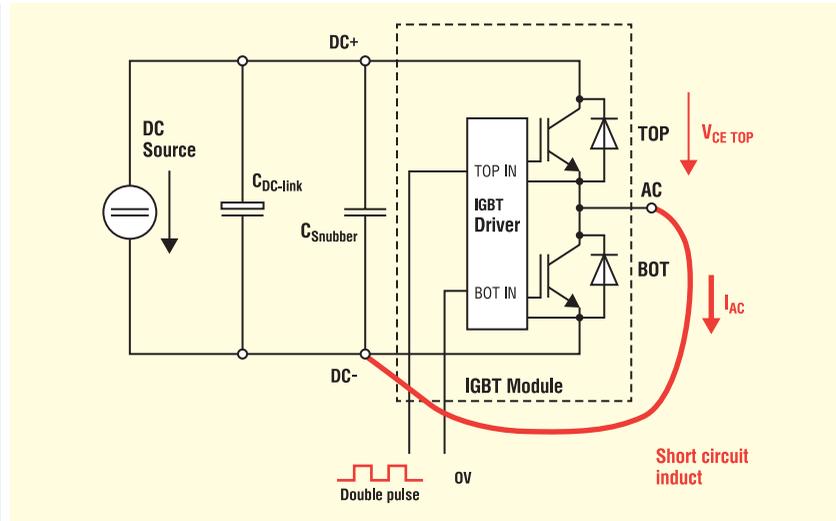


Рис. 5. Вимірювання напруги  $V_{CEpeak}$  на нижньому IGBT; верхній ключ закорочений кабелем або дроселем; подвійний імпульс подають на нижній IGBT



**Рис. 6.** Вимірювання напруги  $V_{CEpeak}$  на верхньому IGBT; нижній ключ закорочений кабелем або дроселем; подвійний імпульс, подають на верхній IGBT

- Зменште індуктивність і повторюйте перевірку до найнижчої індуктивності короткого замикання, зазначеної для застосування. Знайдіть максимальне значення напруги  $V_{CEpeak}$ .
- Реалізуйте режим КЗ на одній стійці мосту, якщо у драйвера немає функції блокування.
- Застосуйте режим подвійного імпульсу для дослідження процесу вмикання IGBT і вимикання діода. Діод (наприклад нижній) вмикається, коли вмикається комплементарний IGBT (наприклад верхній), в той час, як через діод протікає струм. Це відбувається тоді, коли подається другий імпульс.
- Проведіть вимірювання на кожному модулі IGBT. Найвищі значення будуть спостерігатися на модулі, який

розташований на максимальній відстані від конденсаторів ланки постійного струму.

- Виконайте тест при низьких і високих температурах. Високу температуру можна досягти шляхом нагрівання радіатора, наприклад за допомогою нагрітої плити. Температура  $p-n$ -переходу приблизно дорівнює температурі радіатора, оскільки підвищення температури внаслідок одноразового перемикавання є незначним.

**Заземлення та з'єднання з пробником напруги:**

- Заземлення осцилографа необхідне для електробезпеки та проведення точних вимірювань. Тому джерело живлення постійного струму має бути

ізолюваним, щоб запобігти виникненню короткого замикання.

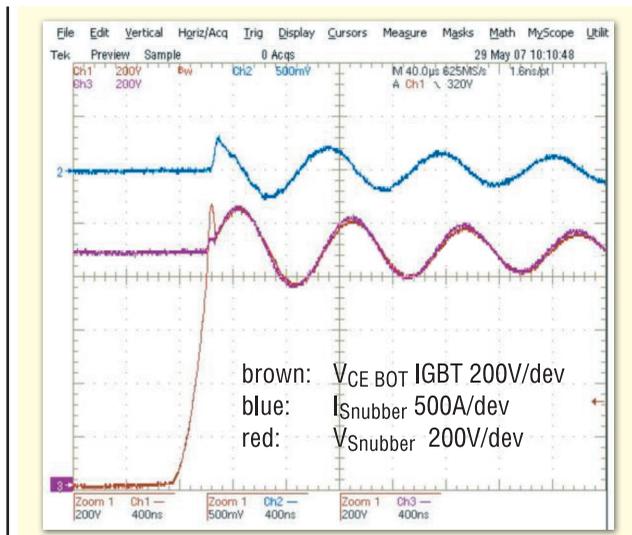
- Заземлення осцилографа диктує необхідність використовувати диференціальні (ізольовані) пробники напруги. Смуга пропускання, а також загасання синфазного сигналу (CMR) у пробнику напруги мають бути достатніми. Для вимірів у колах з IGBT зазвичай достатньо смуги пропускання 100 МГц.
- Напругу синфазної завади на сигналах під час проведення вимірів також можна зменшити шляхом розміщення відповідних феритів на пробниках і на кабелі живлення осцилографа.

**Вимірювання діючого значення струму через конденсатор**

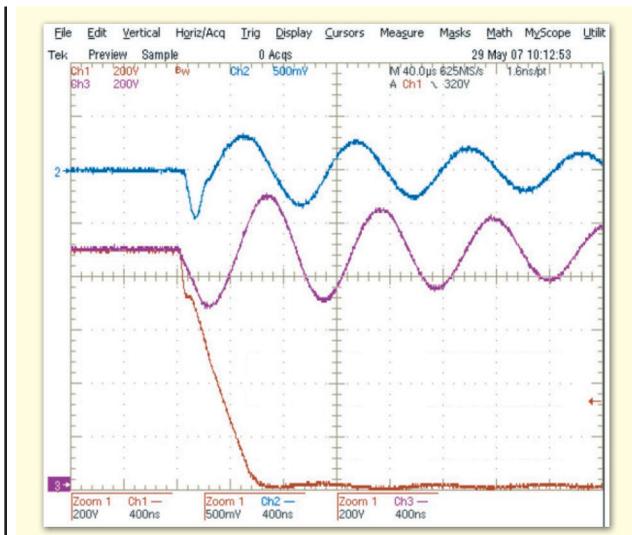
Після вимкнення IGBT і діода в конденсаторі протікає змінний струм. При вимиканні IGBT струм від шини електроживлення комутується в демпферний конденсатор. Це призводить до позитивного сплеску струму в момент перемикавання. Сплеск супроводжується коливаннями між демпферним конденсатором і конденсатором схеми постійного струму (рис. 7).

При відключенні діода з демпферного конденсатора буде «висмоктуватися» зворотний струм відновлення. Це призводить до негативного сплеску струму в момент перемикавання. Подібно до вимкнення IGBT, за сплеском слідують загасаючі коливання, амплітуда яких може бути навіть вищою, ніж при вимкненні IGBT (рис. 8).

Частота загасаючих коливань в обох випадках визначається паразитною індуктивністю шини електрожив-



**Рис. 7.** Вмикання IGBT



**Рис. 8.** Вмикання діода

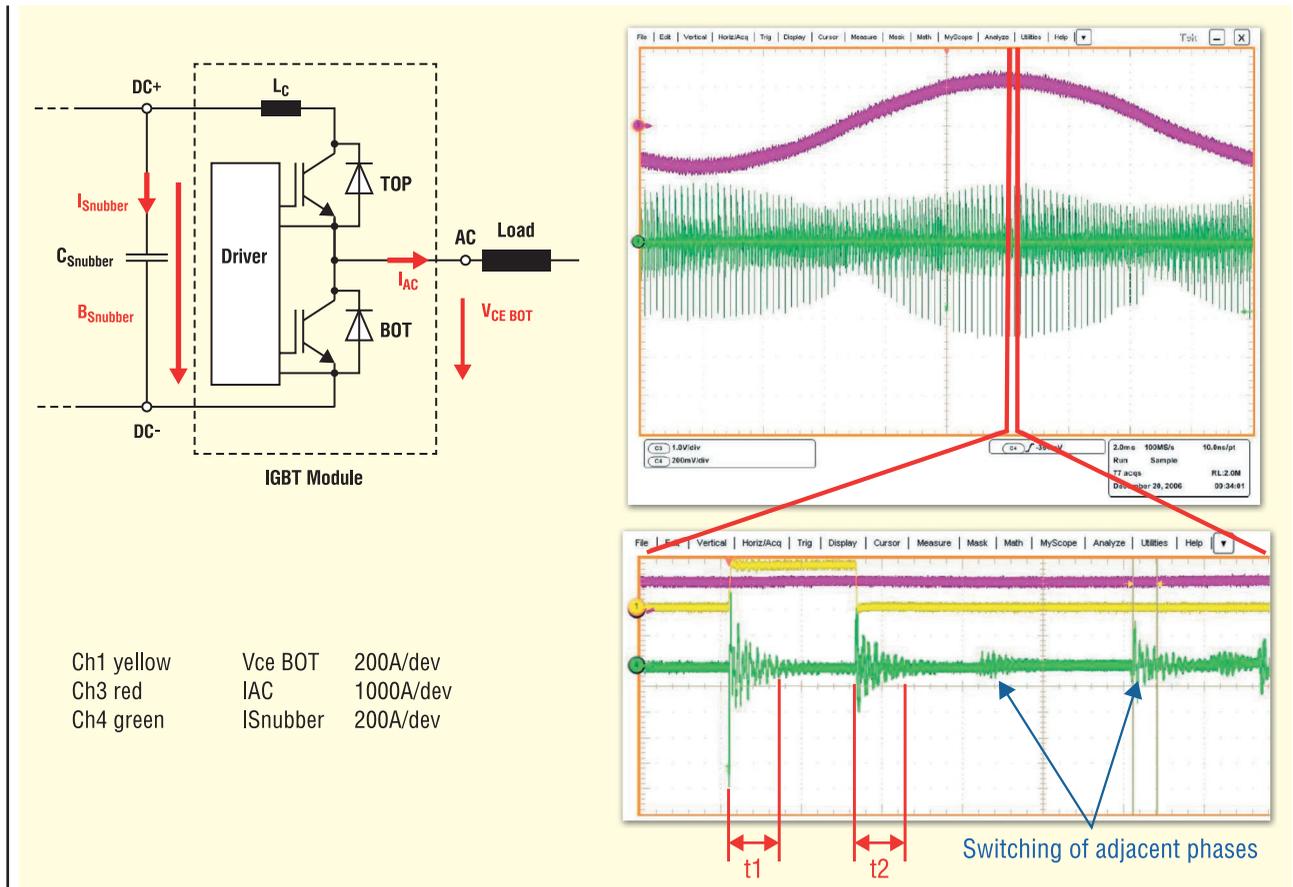


Рис. 9. Вимірювання струму через конденсатор демфера

лення та ємністю демферного конденсатора. Як правило, ця частота знаходиться в діапазоні від 100 кГц до декількох МГц.

$$f_{osc} = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_{DC-Link} \cdot C_{snubber}}}$$

Коливання призводить до втрат в конденсаторі та, як наслідок, до саморозігрівання. У технічному паспорті виробника конденсатора вказано допустиме навантаження конденсатора як діюче значення напруги або струму. Тому необхідно провести відповідні вимірювання та розрахунки, щоб переконатися, що конденсатор не перевантажений.

#### Процедура вимірювання

Хороші результати дає вимірювання струму, яке виконується, наприклад, за допомогою датчика Роговського, розміщеного навколо одного з виводів конденсатора. Вимірювання напруги змінного струму може бути менш точним через її низьке значення порівняно з вищою напругою постійного струму.

Діюче значення часто неможливо обчислити безпосередньо за допомо-

гою функції «вимірювання діючого значення» у сучасному цифровому осцилографі впродовж усього періоду вихідної частоти інвертора. Давачі вносять занадто велику похибку порівняно з низькими загальними діючими значеннями, що негативно впливає на точність результатів вимірів.

Практичне вирішення полягає у вимірюванні діючого значення в межах часу коливань при вимкненні нижнього діода ( $t1$ ) і верхнього IGBT ( $t2$ ) (рис. 9). Ці дві частини встановлюються відповідно до періоду перемикання ( $T=1/f_{sw}$ ), щоб обчислити на основі цього загальне діюче значення для всього періоду перемикання. Це потрібно зробити для всієї синусоїдальної форми напруги перетворювача частоти. Для найгіршого випадку це можна зробити один раз при максимальних значеннях струмів  $I_{RMS}(t1)$  і  $I_{RMS}(t2)$ .

$$I_{RMS} = \sqrt{I_{RMS}^2(t1) \cdot \frac{t1}{T} + I_{RMS}^2(t2) \cdot \frac{t2}{T}}$$

де  $I_{RMS}(t1)$  — діюче значення струму в межах періоду  $t1$ ;  $I_{RMS}(t2)$  — діюче значення струму в межах періоду  $t2$ ;  $T$  — період тактової частоти конвертера.

Вимірювання слід проводити при максимальній робочій температурі, тому що відповідна найвища температура діодного р-п переходу спричиняє найбільший зворотний струм відновлення діода. Максимальні термічні робочі умови — це значення вихідного струму перетворювача, частоти перемикань, температури навколишнього середовища та радіатора, які спричиняють найвищу температуру перетворювача. Короточасні перевантаження у другому діапазоні зазвичай є незначними. Слід враховувати, що допустимі діючі напруга і струм залежать від частоти коливань. Це вказано в технічному паспорті конденсатора.

На демферний конденсатор також діють напруги від сусідніх модулів IGBT з інших фаз у тій самій ланці постійного струму. Однак цей вплив набагато нижчий через імпеданс шини електроживлення інших модулів IGBT.

#### Температура та саморозігрів модуля під час роботи

Постачальники конденсаторів обмежують допустиму температуру конденсатора під час експлуатації. При перевищенні цієї температури конденсатор може відразу вийти з ладу. Також

існують обмеження на температуру саморозігріву, яка додатково навантажує конденсатор. Для критичних застосувань слід перевіряти, щоб температура конденсатора не була перевищена в умовах його експлуатації за максимальної температури.

Конденсатор нагрівається за наявності таких факторів:

- змінний струм, який нагріває пристрій через внутрішні втрати ( $\tan \delta/ESR$ );
- висока температура навколишнього середовища;
- нагрівання розігрітими шинами електроживлення.

Робоча температура визначається температурою навколишнього середовища плюс різниця температур від ефекту саморозігріву.

$$T_{operation} = T_a + dT_{self-heating}$$

Температура навколишнього середовища  $T_a$  — це температура конденсатора, коли він не працює, але встановлений на місці експлуатації. Цю температуру можна виміряти на непідключеному конденсаторі. Згодана температура може бути вищою за температуру в приміщенні через додатковий обігрів за рахунок підключених до конденсатора гарячих шин.

Робочу температуру можна виміряти термопарами, розміщеними всередині конденсатора поблизу гарячої точки, але для цього потрібні спеціальним чином підготовлені конденсатори. Вимірювання тільки температури корпусу конденсатора достатньо, коли відомий тепловий опір від гарячої точки до корпусу ( $R_{th}$ ).

$$T_{operation} = T_{body} + R_{th} \cdot I^2 \cdot R_{ESR}$$

**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](http://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. **CN**

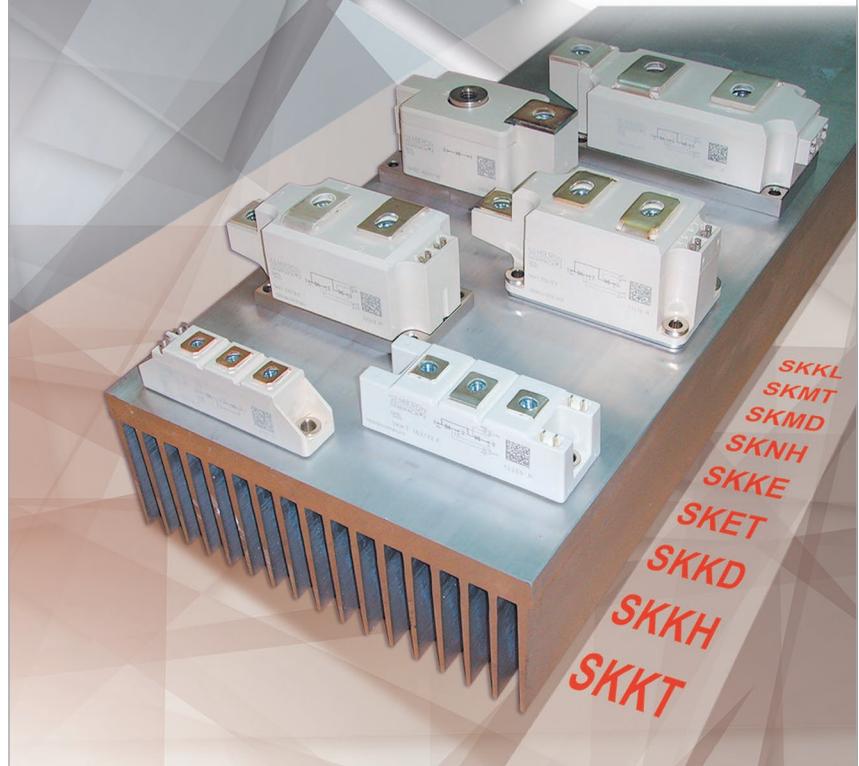
## НВП "ТЕХНОСЕРВІСПРИВІД"

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)