

Вплив ємнісного навантаження кабелю на комутаційні втрати

Арендт Вінтріх (Arendt Wintrich), Райнер Вайс (Rainer Weiss), 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»
sp.tsdrive@gmail.com

В технічних характеристиках комутаційні втрати наведено для індуктивного навантаження, що відповідає вимогам IEC та є допустимими умовами експлуатації для більшості застосовуваних. У електроприводах малої та середньої потужності з довгими кабелями до двигуна (наприклад, сервоприводи) під час визначення комутаційних втрат необхідно враховувати значне ємнісне навантаження. Такої інформації немає в технічних характеристиках і її важко знайти в публікаціях. Наведені у статті результати досліджень корисні для загального розуміння теми та надають деякі рекомендації щодо того, які параметри слід враховувати. Ці результати та рекомендації справедливі не для всіх випадків застосування, тому вони потребують подальшого уточнення.

Основний зміст та більшість рисунків, використаних у цій статті, базуються на магістерській дисертації Деніса Ріхтера (Denis Richter) [3] та публікації Ларса Міддельштедта (Lars Middelstaedt) [4]. Окремі фрази або ілюстрації, взяті з цих публікацій, не позначені як цитата. Ми висловлюємо подяку авторам за дослідження теми та професору Андреасу Ліндемману (Andreas Lindemann) з Інституту електроенергетичних систем Магдебурзького університету за підтримку.

ВИМІРЮВАННЯ КОМУТАЦІЙНИХ ВТРАТ

Вплив ємнісного навантаження кабелю досліджували в типовій схемі застосування електроприводу з трифазним інвертором напруги та асинхронним двигуном ASM, з'єднаними екранованими кабелями різної довжини. На рисунку 1 показано електричну принципову схему з основними компо-

нентами зменшення електромагнітних перешкод, такими як електромережний протизавадний фільтр та конденсатори Y-типу. IGBT-транзистори перемикаються з високою швидкістю (dv/dt) між колами «фаза-фаза» і «фаза-заземлення», що призводить до протікання струму через паразитні ємності між проводами та екраном кабелю. Стрілки на рисунку 1 показують напрямки протікання струму.

Ємнісний струм протікає від IGBT через Y-конденсатори й шасі до кабелю та екрану і назад — до джерела постійного струму та IGBT. Корпус двигуна зазвичай приєднаний до заземлення, тому частина струму також протікає безпосередньо до заземлення і назад до інвертора.

Пристрій підвипробуванням — це модуль MiniSKiiP1 (SKiiP11AC12T4V1 [1]) з номінальним струмом $I_{C(nom)} = 8$ А та напругою блокування $V_{CES} = 1200$ В. Номінальні втрати на перемикання становлять $E_{on} = 0.87$ мДж та $E_{off} = 0.75$ мДж $\rightarrow E_{sv(ref)} = 1.62$ мДж (при 8 А,

600 В, 150 °C, $R_G = 56$ Ом). Типовим застосуванням цього модуля може бути інвертор на 4 або 5.5 кВт.

Модуль підключено до низькоіндуктивної випробувальної плати з конденсатором на напругу постійного струму та з'єднанням із зовнішнім драйвером. Чотирижильний кабель 4×4 мм² з подвійним екраном [7] на максимальний струм 34 А з'єднує інвертор з двигуном. На виході інвертора електромережний протизавадний фільтр був відсутнім.

Концепція заземлення та шляхи паразитних зв'язків

Для аналізу різних систем заземлення було досліджено два різних типи заземлення (рис. 2):

- заземлення підключене до середньої точки напруги джерела постійного струму, що практично відповідає ситуації з вхідним випрямлячем та заземленою точкою «зірки» трифазної мережі електроживлення без Y-конденсаторів;
- ззаземлення підключене до -DC, що відповідає нижньому IGBT T2 для ситуації з Y-конденсаторами між +/-DC та заземленням. Оскільки Y-конденсатори мають набагато вищу ємність, ніж паразитні конденсатори, вони фактично є коротким замиканням для високочастотного струму і для аналізу роботи схеми їх можна замінити перемичками.

Потенціал землі реалізується в лабораторії за допомогою товстого і широкого мідного листа, розташованого під випробувальним стендом. Усі з'єднання із заземленням таких компонентів, як монтажна панель модулів або електродвигун, виконуються за допомогою широких гнучких мідних смуг для забез-

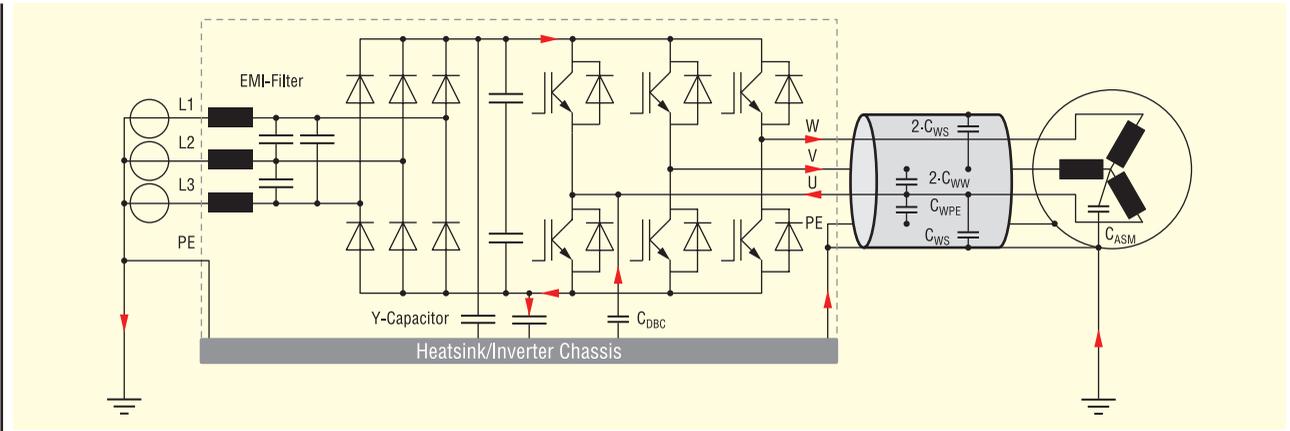


Рис. 1. Схема принципова електрична

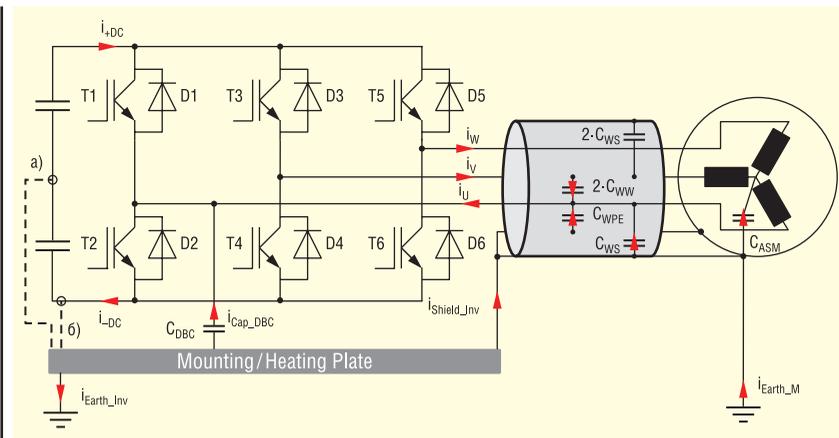


Рис. 2. Концепції заземлення

печення хорошого низькоомного контакту навіть у діапазоні високих частот.

Аналіз ΔV на всіх конденсаторах показує, що абсолютна різниця напруг у всіх випадках дорівнює напрузі джерела постійного струму, тобто від $-V_{CC}/2$ до $+V_{CC}/2$, або від 0 до V_{CC} . Отже, струми через пристрій однакові для обох концепцій (рис. 3). Великий конденсатор у колі постійного струму є хорошим провідником для ємнісного струму на ВЧ. Виходячи з простоти проведення вимірювань, усі подальші дослідження проводилися з потенціалом заземлення на рівні $-DC$.

Паразитна ємність модуля CDBC на DBC (ємнісний струм, спричинений стрибками змінного потенціалу) становить близько 20 пФ на 1 см² з керамікою Al₂O₃ завтовшки 0.38 мм. Вихідна ємність одного IGBT становить C_{obs} = 50 пФ. Згідно з технічними даними, кабель двигуна має погонну ємність між проводом та екраном C_{WS} = 150 пФ/м, а між проводом та екраном C_{WW} = C_{WPE} = 90 пФ/м [7]. Три ємності дротів з'єднані паралельно: дві C_{WW} від фази U до фаз V та W, а одна C_{WPE} від фази U до дроту PE (~270 пФ/м).

Ємності між дротами мають вирішальне значення на процес перемикан-

ня силових модулів, особливо у випадку довгих екранованих кабелів двигуна. Ємність двигуна C_{ASM} не вказувалася, але її вплив на довжині кабелю 10 м відносно низький, що можна побачити на піковому струмі заземлення всього 2 А без урахування ємностей кабелю (рис. 5). Однак

ємність двигуна також може впливати на результати, оскільки невеликий і довгий серводвигун матиме інші ємності, ніж розглянутий тут універсальний ASM.

$$I_C \sim I_{-DC} = I_{S_{shield,inv}} + I_{Earth} + I_{+DC} + I_{Cap_DBC}$$

$$I_{shield,inv} \sim I_{Cap_WPE} + I_{Cap_WS}$$

$$I_{+DC} = I_{load} + 2 \cdot I_{Cap_WW}$$

Вимірювання втрат на перемикання методом подвійного імпульсу

Втрати на перемикання вимірюються згідно з відповідним стандартом IEC60747-9 [5] випробуванням методом подвійного імпульсу. На відміну від стандартних умов випробування, між силовим модулем та індуктивним навантаженням підключено екранований кабель. Крім того, навантаження являє собою не просто котушку, як зазвичай використовується в лабораторії, а ASM з додатковим ємнісним зв'язком від об

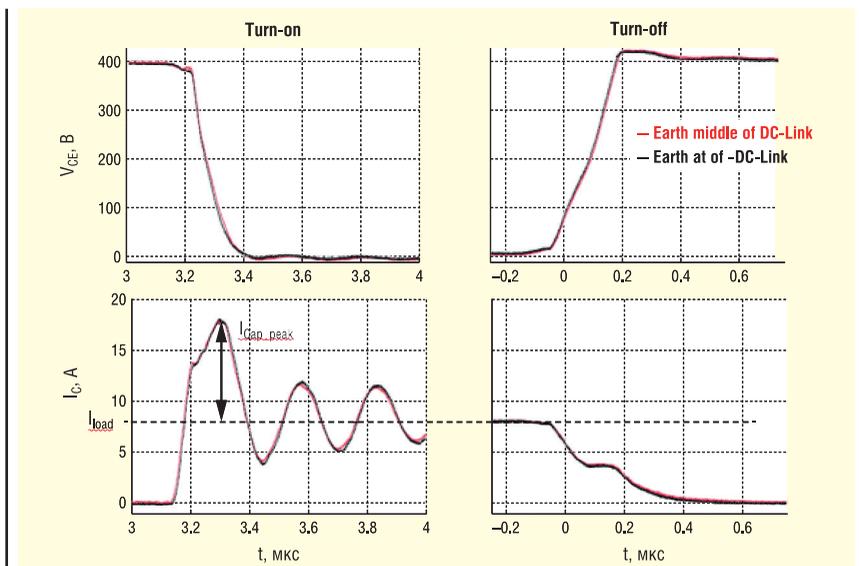


Рис. 3. Напряга V_{ce} та струм I_c в IGBT для концепції двох заземлень

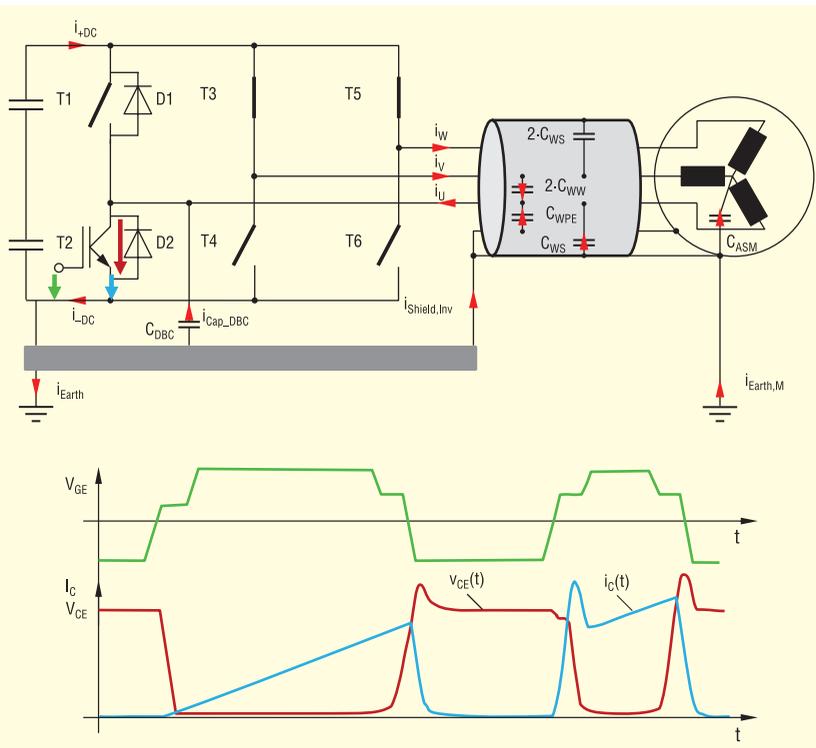


Рис. 4. Конфігурація випробування методом подвійного імпульсу та форма напруг

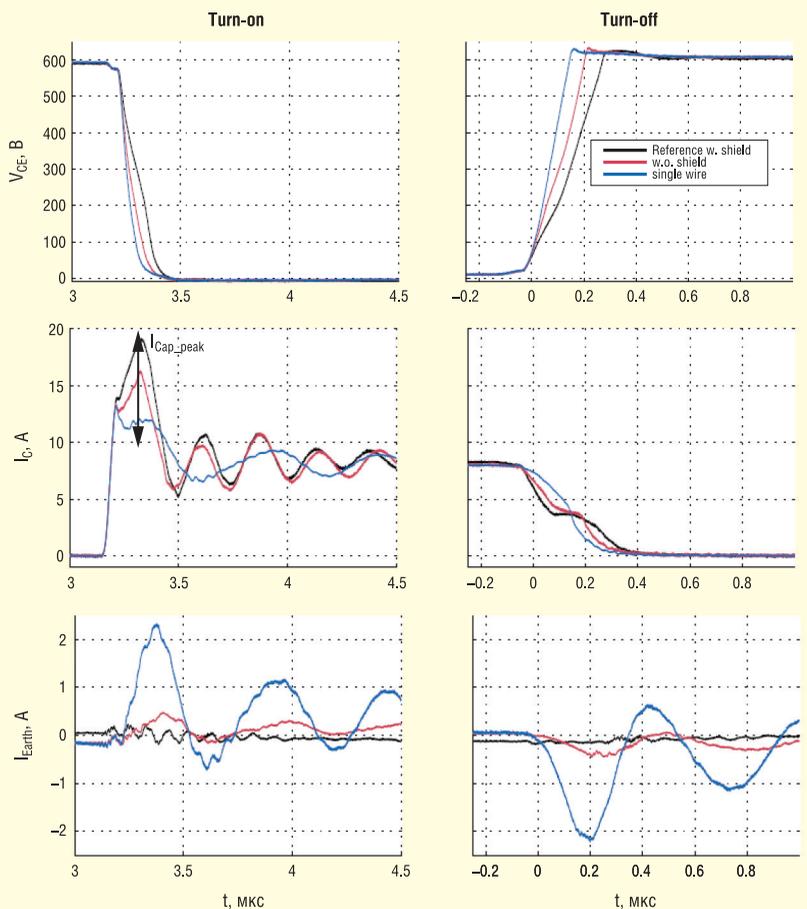


Рис. 5. Криві напруги для різних конфігурацій екранованого або неекранованого кабелю

моток двигуна до корпусу під потенціалом заземлення. Сила струму визначається тривалістю першого імпульсу. Після першого вимкнення IGBT настає період холостого ходу, доки IGBT не буде ввімкнено вдруге. Струм залишається майже постійним протягом періоду холостого ходу. Перше вимкнення та друге ввімкнення модуля використовуються для вимірювання енергії перемикавання (див. форми сигналів на рис. 4). Більш детальний опис налаштування та необхідного обладнання для випробування методом подвійного імпульсу можна знайти в [6].

Комутований пристрій — це нижній IGBT фази U (T2) з верхнім зворотнім діодом (D1), як показано на рисунку 4. Інші п'ять IGBT або постійно увімкнені (T3, T6 = +DC на фазах V та W), або постійно вимкнені (T1, T4 та T6).

Нормальні умови перемикання такі:

- струм навантаження $i_U = I_{C(nom)} = 8\text{ A}$;
- напруга постійного струму $V_{cc} = 600\text{ V}$;
- $T_j = 250\text{ }^\circ\text{C}$;
- напруга живлення драйвера $V_{GG} = +15\text{ V}/-7\text{ V}$;
- $R_G = 56\text{ }\Omega$ (відповідає значенню з технічного паспорта модулів IGBT);
- довжина кабелю = 10 м, екран з обох кінців підключений до заземлення.

РЕЗУЛЬТАТИ З ВАРІАЦІЄЮ РІЗНИХ ПАРАМЕТРІВ

Кабельна котушка або прямий відрізок кабелю

Для екранованого кабелю не має значення, як прокладений кабель — по прямій чи на котушці. Це пояснюється тим, що зовні кабелю немає ємнісного зв'язку між частинами його екрану і також немає змін електричного потенціалу. Осцилограми або криві напруги (рис. 5) показують обидва варіанти кабелю: з екраном або без.

Для порівняння були досліджені три випадки:

- опорне вимірювання з екранованим кабелем довжиною 10 м;
- екран знято, але окремі дроти залишаються скрученими (ємності «фаза-фаза», ємності між електродвигуном і заземленням, ємність між силовим модулем і заземленням);
- одинарні дроти лише для трьох фаз (не скручені, тільки ємності від двигуна та силового модуля до заземлення).

Шляхом видалення екрану та усунення наводки між дротами величина ємнісного струму I_{Cap_peak} зменшується з 9 А (при наявності екрану) до 6.5 А без

екрану і до 2 А з одним проводом. Якщо наводка у кабелі зникає, то ємнісний струм CASM може протікати назад до інвертора лише через потенціал заземлення. В інших випадках цей струм протікає через екран та провід заземлення. Якщо ємнісний струм силою 2 А від електродвигуна відняти від загального ємнісного струму, то залишається 7 А для екранованого кабелю та 4.5 А для скручених дротів. Співвідношення між двома струмами дуже добре корелює з ситуацією по ємності для обох випадків: 420 пФ/м для екранованого кабелю (150 пФ/м + 3 · 90 пФ/м) до 270 пФ/м для чотирьох скручених проводів.

Як і очікувалося, швидкість наростання напруги dv_{CE}/dt збільшується зі зменшенням ємнісного навантаження. Енергія на перемикання E_{sw} зменшується від опорної точки з екранованим кабелем довжиною 10 м (1.4 мДж) приблизно на 22% без екранування (1.1 мДж) та додатково на 10% для одного дроту (1 мДж). Енергія в 1 мДж для одного дроту відповідає температурі 25 °С і чисто індуктивному навантаженню для обладнання, яке використовувалося у вимірюваннях, зазначених у технічному паспорті.

Довжина кабелю

Вплив довжини кабелю досліджувався на довжинах від 2 до 50 м для 5 різних довжин (рис. 6). Під час увімкнення ємнісний струм задає характер перемикання. Зі збільшенням довжини кабелю амплітуда коливань струму зростає. На 50 м IGBT плавно виходить зі стану насичення та обмежує струм приблизно до 24 А (3x $I_{C(nom)}$). При наступній негативній півхвилі струм перетинає нульову лінію, антипаралельний діод проводить струм, і напруга на ключі стає негативною. Коливання напруги у джерелі +DC викликані ємностями між проводами кабелю (C_{WW}). Тут зворотний струм відновлення зворотного діоду є лише першим невеликим піком амплітудою 12 А та тривалістю близько 100 нс. Струм різниці між I_C та I_{+DC} зумовлений ємностями відносно потенціалу землі (C_{WS} , C_{WPE} , C_{DBC} , C_{ASM}) силового модуля та кабельного входу, і протікає через монтажну плату модулів, а також через потенціал землі до електродвигуна. Цей додатковий струм і (частково) менше значення dv_{CE}/dt збільшують втрати при ввімкненні модуля E_{on} на понад 250% порівняно зі значенням втрат без кабелю (рис. 7).

При вимкненні модулів ми можемо спостерігати полегшене перемикання, оскільки конденсатори на виході змен-

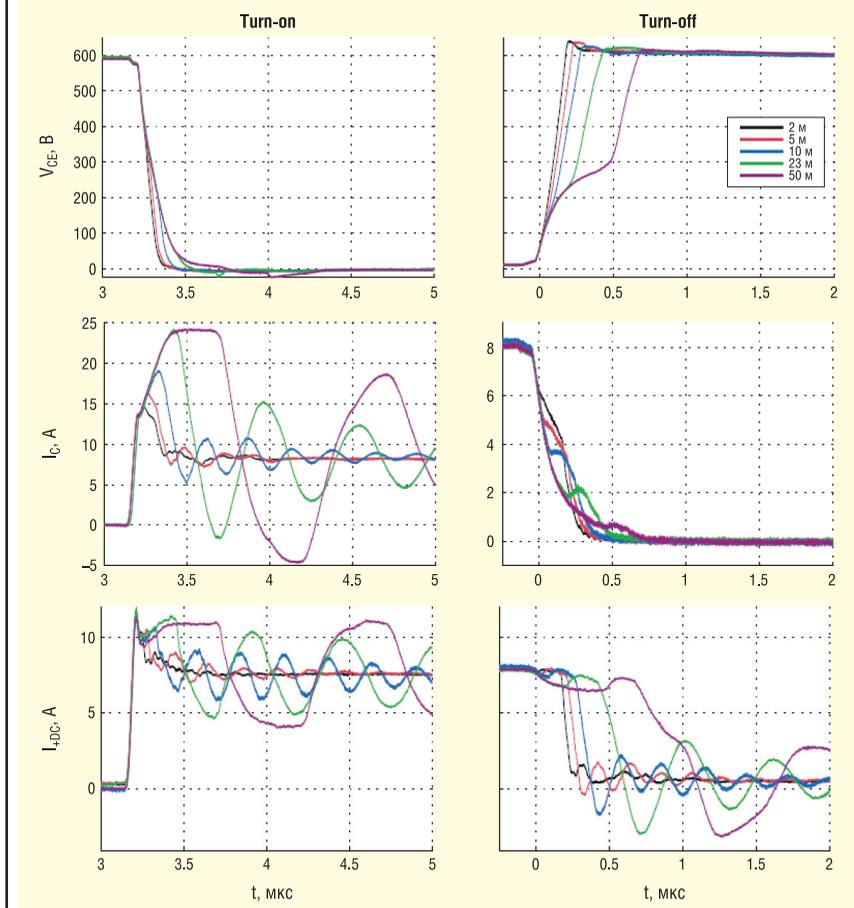


Рис. 6. Криві напруги та струму в IGBT для кабелів різної довжини при 250 °С

шують наростання напруги. Основна частина ємнісного струму протікає через ланку постійного струму. Втрати E_{off} при вимкненні IGBT зменшуються приблизно до 50%, але високочастотна частина струму I_{DC+} спричиняє додаткові втрати в конденсаторі ланки постійного струму. Спостережуваний на графіку стрибок вихідної напруги можна пояснити певними ефектами розповсюдження коливань у кабелі, які не залежать від

швидкості перемикання напівпровідника або умов керування затвором. Чим довший кабель, тим помітнішим стає стрибок напруги. Висота плоскої вершини зменшується зі струмом, і при низьких струмах напруга може мати кілька таких плато.

Вплив параметрів схеми можна легко відтворити за допомогою моделювання, описаного в роботі [3]. Автор спротив складну електромережу з L_{W1} , R_{W1} , C_{W1}

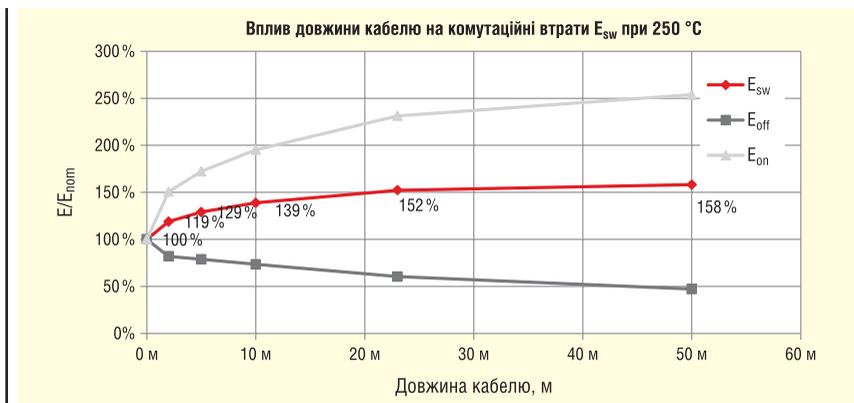


Рис. 7. Втрати на комутацію як функція довжини кабелю при номінальному струмі (8 А) відносно втрат за відсутності кабелю (довжина кабелю 0 м) та кімнатній температурі

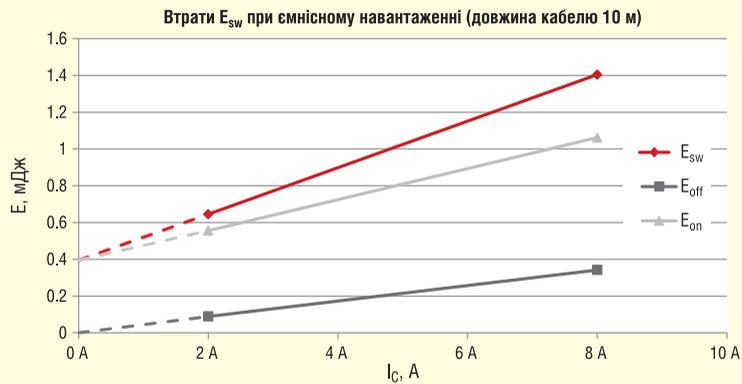


Рис. 8. Вплив сили струму на комутаційні втрати при 25 °C

C_{WPE} та C_{WIS} до простої однопровідної мережі, яка містить схему з п'яти розподілених по довжині елементів RLC. Для кабелів довжиною понад 2.5 м слід використовувати схему з розподіленими елементами RLC замість окремих зосереджених елементів, оскільки тоді це буде «довга лінія» відповідно діапазону частот, що відповідає часу перемикання IGBT. Елементам RLC були надані значення, наведені в технічному описі кабелю, з деякими невеликими модифікаціями для забезпечення відповідності результатів вимірювань та моделювання.

Струм навантаження

Струм навантаження має суттєвий вплив на втрати при увімкненні модуля та на час наростання напруги під час вимкнення. Хоча E_{off} дорівнює нулю, коли струм падає до нуля, з графіка видно, що $E_{on} \gg 0$ при 0 А (рис. 8). Залишок енергії (0.4 мДж) становить близько 28% від комутаційних втрат за номінального струму та $T_j = 25$ °C. Приріст втрат (абсолютне значення) майже постійний у всьому діапазоні струму інвертора.

Негативний ефект, спричинений наявністю кабелю, зменшується з підви-

щенням температури переходу, оскільки втрати у напівпровіднику зростають при високих T_p , а втрати, викликані впливом ємностей у кабелі, залишаються майже постійними. Але в режимі холостого ходу при $T_j = 125$ °C все ще залишається близько 22% від номінальних втрат, зазначених у паспорті даних, і приблизно 20% при $T_j = 150$ °C. Ці додаткові 20% E_{sw} будуть використані пізніше для розрахунку комутаційних втрат інвертора з урахуванням впливу кабелю.

З розгляду кривої струму видно, що величина ємнісного струму ($\sim +12$ А) є подібною для низького та високого рівня струму навантаження. Для малих струмів напрямок протікання струму змінюється під час коливань, і антипаралельний діод починає проводити струм. Малий струм не здатний зарядити ємності, підключені паралельно до IGBT, при швидкості зміни напруги більшої, ніж 600 В/мкс. Тому напруга зростає пропорційно значенню струму навантаження. Ємність для конфігурації з кабелем довжиною 10 м становить $2 \text{ мкА}/600 \text{ В} = 3 \text{ нФ}$.

Напруга ланки постійного струму

Вплив напруги ланки постійного струму на комутаційні втрати аналогічний впливу для стандартних умов комутації з чисто індуктивним навантаженням. Напруга E_{on} (400 В) становить приблизно 50% від її значення при 600 В, а напруга E_{off} (400 В) — 78% від її значення при 600 В. Показник ступеня напруги у виразі для загальної енергії перемикання становить 1.4, як це зазвичай використовується для даної технології IGBT при індуктивному навантаженні:

$$E_{sw}(400 \text{ В}) = E_{sw}(600 \text{ В}) \cdot \left(\frac{400 \text{ В}}{600 \text{ В}}\right)^{1.4}$$

Температура p-n-переходу

Температуру чипа підвищували за допомогою нагрітої пластини до 125 °C для вимірювання впливу температури напівпровідника. Після цього втрати на комутацію вимірювали знову для кабелю різної довжини.

Втрати збільшуються з довшими кабелями для обох температур. Збільшення відсотка втрат порівняно з номінальними втратами, зазначеними в паспорті, менше за високих температур, ніж за низьких. Причина цього в тому, що втрати в напівпровідниках зростають з підвищенням температури, тоді як ємнісна частина втрат залишається майже постійною. Звичайно, абсолютне значення

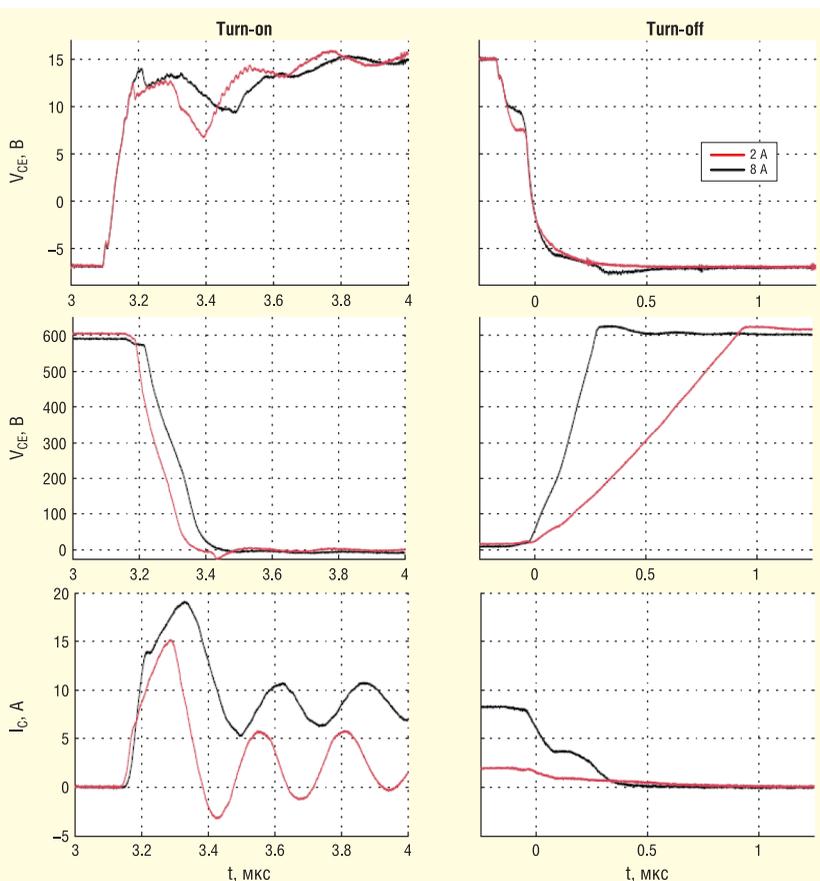


Рис. 9. Графіки для струму $I_c = 2$ А та $I_c = 8$ А

при 125 °C (100% ~ 1.5 мДж) вище, ніж при 25 °C (100% ~ 1 мДж).

Температурний коефіцієнт комутаційних втрат з кабелем 10 м дещо нижчий (0.0025/°C) порівняно з умовами, зазначеними в паспорті даних, на відстані 0 м (0.003/°C):

$$E_{sw}(T_j, 10 \text{ м}) = E_{sw}(125 \text{ °C}, 10 \text{ м}) \cdot \left(1 + \frac{0.0025}{1 \text{ °C}} \cdot (T_j - 125 \text{ °C})\right).$$

Приклад

Оцінка комутаційних втрат при 100 °C та довжині кабелю 20 м; за основу взяті комутаційні втрати при 125 °C без кабелю $E_{sw} = 1.5 \text{ мДж}$:

$$E_{sw}(125 \text{ °C}, 20 \text{ м}) = E_{sw}(125 \text{ °C}, 0 \text{ м}) \cdot 1.3 = 1.95 \text{ мДж}.$$

Коефіцієнт масштабування «1.3» для довжини кабелю взятий з рисунку 12.

$$E_{sw}(100 \text{ °C}, 20 \text{ м}) = E_{sw}(125 \text{ °C}, 20 \text{ м}) \cdot \left(1 + \frac{0.0025}{1 \text{ °C}} (100 \text{ °C} - 125 \text{ °C})\right),$$

$$E_{sw}(125 \text{ °C}, 20 \text{ м}) = 1.95 \text{ мДж} \cdot 0.94 = 1.83 \text{ мДж}.$$

НАСЛІДКИ

Обчислення комутаційних втрат

У загальній формулі для комутаційних втрат ШІМ-інвертора [2] втратами в режимі холостого ходу нехтують. Вважається, що при нульовому струмі вони дорівнюють нулю, навіть якщо це не зовсім вірно навіть для чисто індуктивного навантаження. У будь-якому випадку протікатиме невеликий ємнісний струм, спричинений ємністю напівпровідників та ємністю модулів відносно заземлення. Довідкові значення «ref», що використовуються у формулі, — це параметр вимірювання, зазначений у технічному паспорті за номінальних умов, зазвичай $T_{j[ор,мак]} I_{C[ном]}$ та, наприклад, 600 В для IGBT на 1200 В:

$$P_{sw} = f_{sw} \cdot E_{sw(ref)} \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot I_{out}}{\pi} \cdot \frac{1}{I_{ref}} \cdot \left(1 + TC \cdot (T_j - T_{ref})\right) \cdot \left(\frac{V_{cc}}{V_{ref}}\right)^{Exp_v}.$$

Необхідно додати до цієї формули вираз для ємнісного струму кабелю. Додатковий вираз дає приріст енергії перемикачів (тут 20% при опорній температурі 150 °C, див. також вище), яке прямо пропорційне частоті перемикачів та за-

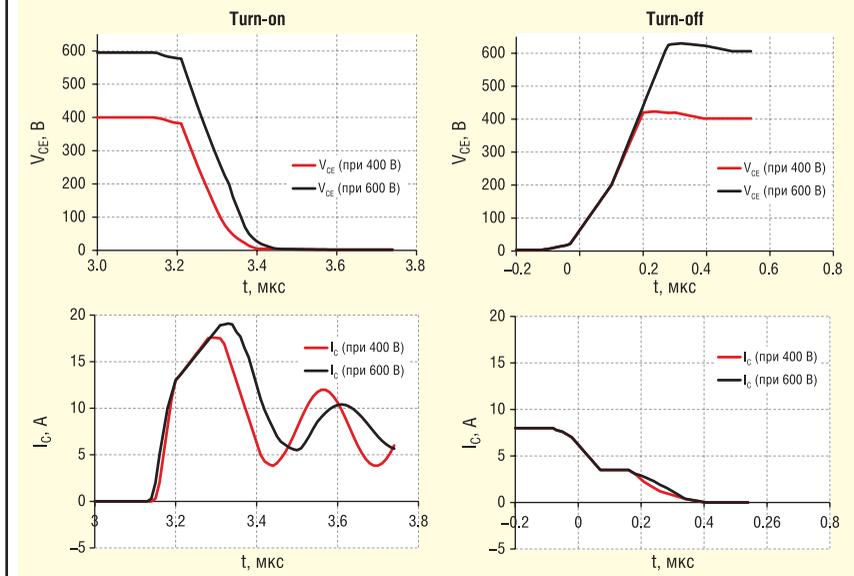


Рис. 10. Графіки для різних напруг ланки постійного струму

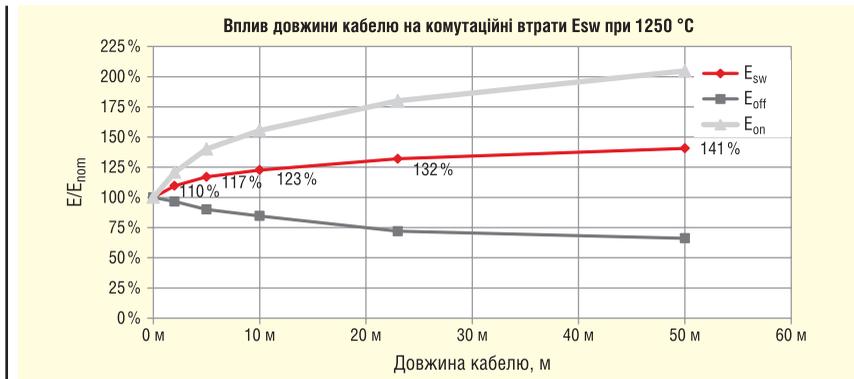


Рис. 11. Втрати на комутацію як функція довжини кабелю при номінальному струмі (8 А) відносно втрат за відсутності кабелю (довжина кабелю 0 м) та температури 1250 °C

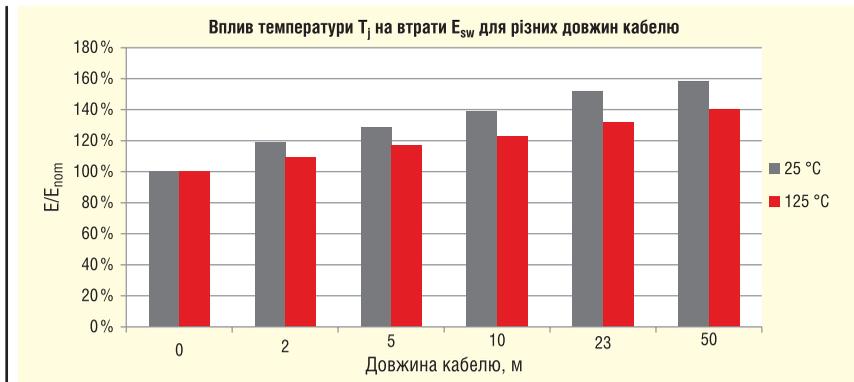


Рис. 12. Порівняння комутаційних втрат при 25 °C і 125 °C для номінального струму 8 А і відсутності кабелю (довжина кабелю 0 м)

лежить від довжини кабелю та прикладеної напруги. Вплив довжини кабелю (тут «0.37») вимірюється показником ступеня у виразі для збільшення комутаційних втрат. Коефіцієнт «0.5» пояснюється тим, що формула дійсна для повного періоду, але ємнісне перемикачів відбувається лише в активній півхвилі. IGBT також

перемикається у другій півхвилі під час вільного ходу, але без зміни напруги.

$$P_{sw} = f_{sw} \cdot E_{sw(ref)} \cdot \left(0.5 \cdot 0.2 \cdot \left(\frac{I_{cable}}{10 \text{ м}}\right)^{0.37} + \frac{\sqrt{2} \cdot I_{out}}{\pi} \cdot \frac{1}{I_{ref}} \cdot \left(1 + TC \cdot (T_j - T_{ref})\right) \cdot \left(\frac{V_{cc}}{V_{ref}}\right)^{1.4}\right)$$

Приклад

Порівняння комутаційних втрат ШІМ-інвертора при $V_{CC} = 700$ В, $I_{out} = 7$ А та $f_{sw} = 8$ кГц, $E_{sw} = 1.62$ мДж (8 А, 600 В, 150 °С):

а) без кабелю:

$$P_{sw(a)} = 8 \text{ кГц} \cdot 1.62 \text{ мДж} \cdot \left(0.5 \cdot 0.2 \cdot \left(\frac{0 \text{ М}}{10 \text{ М}} \right)^{0.37} + \frac{\sqrt{2} \cdot 7 \text{ А}}{\pi} \cdot \frac{1}{8 \text{ А}} \cdot (1 + 0.0025 \cdot (125 \text{ °С} - 150 \text{ °С})) \right) \left(\frac{700 \text{ В}}{600 \text{ В}} \right)^{1.4}$$

$$P_{sw(a)} = 5.9 \text{ Вт.}$$

б) з кабелем завдовжки 20 м:

$$P_{sw(b)} = 8 \text{ кГц} \cdot 1.62 \text{ мДж} \cdot \left(0.5 \cdot 0.2 \cdot \left(\frac{20 \text{ М}}{10 \text{ М}} \right)^{0.37} + \frac{\sqrt{2} \cdot 7 \text{ А}}{\pi} \cdot \frac{1}{8 \text{ А}} \cdot (1 + 0.0025 \cdot (125 \text{ °С} - 150 \text{ °С})) \right) \left(\frac{700 \text{ В}}{600 \text{ В}} \right)^{1.4}$$

$$P_{sw(b)} = 8 \text{ Вт.}$$

З огляду на подібні втрати провідності IGBT за таких робочих умов ($P_{cond} \sim 5.8$ Вт), це означає, що загальні втрати зростають з $P_{IGBT} = P_{sw} + P_{cond} = 11.7$ Вт без кабелю до 13.8 Вт (+18%) з екранованим кабелем довжиною 20 м. Добре те, що під час перевантаження вплив у відсотках зменшується (наприклад, 2-кратне перевантаження з $I_{out} = 14$ А). Втрати провідності зростають до $P_{cond} = 19$ Вт, тоді як втрати на комутацію без кабелю тепер становлять $P_{sw(a)} = 11.9$ Вт, а з кабелем 20 м — $P_{sw(b)} = 14.8$ Вт. Відповідно, загальні втрати збільшуються з 30.9 Вт до 33.8 Вт (+9%).

Час блокування або затримки

Блокування або час затримки необхідні для запобігання динамічному короткому замиканню між силовими ключами однієї гілки інвертора. Це повинно гарантувати, що один IGBT повністю вимкнено до того, як увімкнеться інший. Час затримки, час наростання та спаду з технічних характеристик не можна використовувати для прогнозування мінімального часу блокування зі значним ємнісним навантаженням. Час наростання напруги під час вимкнення майже при нульовому струмі може збільшуватися до діапазону мкс (рис. 9). У цьому випадку мінімальний час блокування визначається ємністю кабелю, а не напівпровідником. Нехтування цим ефектом може призвести до додат-

кових втрат у мостовій гілці інвертора, що перевищують описаний ємнісний вплив. Якщо увімкнення відбулося занадто рано, струм не встигає комутуватися до паралельно увімкненого зворотного діода, напруга на протилежному ключі все ще присутня, і зазвичай пасивно увімкнений пристрій з'єднує дві ємності (ланку постійного струму та вихідну ємність) з різними потенціалами. Ємнісний струм спричинятиме втрати в пристрої, який зазвичай вмикається без втрат. Це не динамічне коротке замикання, оскільки канал вимкненого пристрою вже закритий, але вплив на втрати є аналогічним.

Виявлення короткого замикання

Найсучасніший захист від короткого замикання — це моніторинг $V_{CE(sat)}$ коли пряма напруга IGBT порівнюється з опорною напругою, яка зазвичай становить 5...7 В. Якщо пряма напруга перевищує опорну, драйвер переходить у режим відмови, і IGBT вимикається. Моніторинг активується через кілька мкс після команди ввімкнення, щоб переконатися, що IGBT досяг усталеної прямої напруги. Ця затримка називається часом холостого ходу або гасіння. Але якщо коливання тривають кілька мкс, як показано на рисунку 6, тоді час гасіння необхідно збільшити. Для реальних IGBT, таких як 4-те покоління Infineon IGBT з тривалістю імпульсів короткого замикання $t_{psc} \leq 10$ мкс, це цілком можливо. Тенденція зменшення розміру кристала та одночасного збільшення щільності струму все більше зменшує час t_{psc} для майбутніх поколінь IGBT; вже сьогодні це можна побачити для низьковольтних IGBT та SiC-MOSFET. У таких випадках може статися, що моніторинг $V_{CE(sat)}$ більше неможливий або що відбудеться помилкове вимкнення модуля.

ВИСНОВКИ

Екрановані кабелі часто необхідні для забезпечення вимог електромагнітної сумісності. Паразитні ємності кабелю збільшують енергію увімкнення IGBT більше, ніж зменшують енергію вимкнення модулів. Отже, загалом слід розраховувати на значне збільшення енергії перемикавання. Це збільшення залежить від довжини кабелю. Його можна визначити в режимі холостого ходу при нульовому струмі та додати як збільшення енергії перемикавання для всього діапазону струму.

Для більших номінальних струмів ефект додаткових втрат стає менш важ-

ливим, оскільки індуковані напівпровідником комутаційні втрати залежать майже лінійно від номінального струму чипа (10 А IGBT → 100 А IGBT: коефіцієнт 10), де ємність кабелю зростає менш ніж у 3 рази за такого ж збільшення номінальної струмової здатності вплив екранованого кабелю, оскільки це залежить від максимальної довжини кабелю, співвідношення між втратами на комутацію та провідність, а також режиму роботи двигуна (S1, S2, ... S8). Поки декілька ват на IGBT дають значний внесок у загальні втрати, їх слід враховувати. Ємності кабелів також впливають на втрати в ланці постійного струму, на час перемикавання та блокування, а також на час гасіння в захисті від короткого замикання з моніторингом $V_{CE(sat)}$.

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

**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. A. Wintrich, U. Nicolai, W. Tursky, T. Reimann, «Application Manual Power Semiconductor», 2nd edition, ISLE Verlag 2015, ISBN 978-3-938843-83-3.
3. Dennis Richter, «Detaillierte Untersuchung des Schaltverhaltens von Leistungshalbleitern bei langem Motorkabel», Masterarbeit, Otto von Guericke Universität Magdeburg, 2016.
4. L. Middelstädt, D. Richter, A. Lindemann, A. Wintrich, «Influence of the Configuration of the Load Cable on Switching Characteristics of IGBTs», Proceedings, PCIM Europe Nuremberg, 2016.
5. IEC60747-9 Semiconductor devices — Discrete devices, IGBT.
6. J. Lamp, «GBT Peak Voltage Measurement and Snubber Capacitor Specification», Application Note AN 07-006 — rev01, Semikron Danfoss, www.semikron-danfoss.com
7. www.helukabel.com, TOPFLEX®-EMV-2YSLCY-J.