

DOI: <https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.69>

УДК: 681.5:52

Явище комутаційної перенапруги в електроприводах на основі високошвидкісних ключів, постановка проблеми та огляд варіантів її вирішення

Ковбаса Сергій Миколайович¹⁾

Д-р техніч. наук, доцент, зав. каф. Автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2954-455X>; skovbasa@ukr.net

Вербовий Юрій Васильович¹⁾

Аспірант каф. Автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-7032-9536>; yurii.verbovyi@gmail.com

¹⁾ Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Берестейський пр., 37, Київ, 03056, Україна

АНОТАЦІЯ

У статті розглянуто проблему виникнення комутаційних перенапруг в електроприводах, побудованих на основі високошвидкісних напівпровідникових ключів, зокрема SiC-MOSFET та GaN-транзисторів. Показано, що використання напівпровідників із широкою забороненою зоною дозволяє значно підвищити частоту широтно-імпульсної модуляції, покращити динамічні властивості інвертора та зменшити габарити перетворювачів. Разом з тим, висока швидкість комутації зумовлює появу суттєвих перенапруг на клеммах двигуна, що спричиняє прискорене старіння ізоляції та може призвести до передчасного виходу з ладу електричної машини. Проведено огляд основних підходів до зменшення або запобігання прояву цього явища, серед яких: використання синусоїдальних та RLC-фільтрів різних топологій основною метою яких є узгодження хвильових параметрів кабелю з його навантаженням (двигуном), застосування багаторівневих інверторів, а також спеціалізованих схем з діодами для обмеження рівня перенапруги. Результати роботи можуть бути використані при проєктуванні сучасних високодинамічних електроприводів.

Ключові слова: dv/dt - фільтр; перенапруга; напівпровідники з широкою забороненою зоною; високочастотна ШІМ; електропривод; силова електроніка; SiC-MOSFET; Si-IGBT; GaN транзистор

Швидкий розвиток напівпровідникової перетворювальної техніки, спрямований на підвищення її енергетичних характеристик та зменшення масогабаритних показників, тісно пов'язаний із постійним вдосконаленням елементної бази, зокрема силових напівпровідникових приладів, які є основою будь-якої сучасної топології перетворювача.

Сьогодні великі інвестиції та дослідницькі зусилля спрямовані на розробку нових та покращення існуючих структур силових приладів на основі напівпровідників з широкою забороненою зоною (Wide-Bandgap, WBG), таких як карбід кремнію (SiC) та нітрид галію (GaN). Електричні та фізичні властивості SiC та GaN роблять їх перспективними матеріалами для заміни традиційного кремнію при виготовленні напівпровідникових ключів, що здатні працювати при високих напругах, струмах та частотах широтно-імпульсної модуляції.

Пристрої на основі WBG-напівпровідників в перспективі можуть повністю замінити кремнієві (Si) IGBT та MOSFET у високодинамічних приводах сучасних верстатів, тягових електроприводах, приводах електричних літальних апаратів, а також в статичних перетворювачах параметрів електричної енергії різного технологічного призначення [1]. В електроприводах збільшення частоти ШІМ дозволяє зменшити некомпенсовану сталу часу інвертора, а також затримки в контурах регулювання струмів, збільшуючи їх смугу пропускання, що в свою чергу призводить до можливості розширити смуги пропускання контурів швидкості та положення, що особливо важливо в високодинамічних приводах [2].

Наприклад, фірмою Yaskawa був розроблений високопродуктивний серводвигун « Σ (sigma)-7F» з інтегрованим перетворювачем на основі GaN транзисторів [3]. Для центральної залізниці Японії компанія Mitsubishi розробила першу в світі тягову електромеханічну систему для швидкісних поїздів N700 Shinkansen, що повністю побудована

This is an open access article under the CC BY license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk>)

з використанням SiC транзисторів [4]. В автомобільній індустрії використання приладів на основі SiC також є дуже поширеним явищем, наприклад Toyota продемонструвала побудований повністю на SiC напівпровідниках блок керування живленням (PCU, Power Control Unit) для своїх гібридних та повністю електричних транспортних засобів. Тяговий інвертор електромобіля Tesla Model 3 також виготовлений на SiC напівпровідниках [5-7].

Однак використання високошвидкісних ключів в електроприводі має недоліки пов'язані з тим, що зазвичай двигун підключається до перетворювача за допомогою кабелю. Висока швидкість наростання вихідної напруги інвертора, зумовлена високою швидкодією ключа разом з ефектами довгої лінії призводить до значного перевищення напруги на клеммах двигуна [8]. Фактично, коли час наростання напруги t_r на виході інвертора становить щонайменше половину або менше часу поширення імпульсу напруги t_p відбувається повне відбиття [9]. Тому, коли $t_r < 2t_p$, напругу V_m на клеммах двигуна можна виразити формулою (1), де V_{dc} – напруга ланки постійного струму, а Γ – коефіцієнт відбиття:

$$V_m = V_{dc}(1 + \Gamma). \quad (1)$$

Теоретично, максимальне значення Γ дорівнює 1, тому напруга на клеммах двигуна може перевищувати значення напруги ланки постійного струму у два рази. Однак на практиці в найгіршому випадку при перекритті декількох одночасних перехідних процесів максимальна перенапруга може бути ще вищою [10].

У [11, 12] стверджується, що повне відбиття (отже, подвоєння напруги на клеммах двигуна) може відбутися, коли $t_r < 3t_p$. Однак, припускаючи, що перехідний процес повністю затухає, можна висунути гіпотезу про критичний час наростання (мінімальна межа часу наростання), що дорівнює $2t_p$. Це припущення можна вважати обґрунтованим, коли час між двома імпульсами становить щонайменше 3τ [12], причому τ визначається як у (2):

$$\tau = 2 \frac{l_c}{r_{hf}}. \quad (2)$$

де r_{hf} – хвильовий опір кабелю, а l_c – погонна індуктивність кабелю.

Ще однією суттєвою проблемою, що пов'язана з високим dv/dt є нерівномірний розподіл напруги по витках обмотки електричної машини, що скорочує термін служби ізоляції, збільшуючи вірогідність передчасних відмов через збільшення ймовірності точкових пошкоджень (пробоїв) ізоляції. Високі частоти комутації також спричиняють протікання синфазних струмів через паразитні ємності в двигуні.

В літературі [14-17] було запропоновано багато рішень даної проблеми. Перший варіант - використання синусоїдальних фільтрів на виході інвертора, які зазвичай потребують габаритних індуктивностей та ємностей. Це призводить до збільшення масогабаритних показників інвертора, проте при використанні високочастотної ШІМ ця проблема може бути частково вирішена.

Другий варіант - зменшення dv/dt можна досягти штучно зменшивши швидкість комутації транзистора, наприклад збільшивши опір затворного резистора або використавши драйвер який дозволяє регулювати (обмежувати) струм затвора у процесі комутації транзистора. Однак при цьому збільшуються втрати на переключення в SiC-MOSFET, що усуває переваги використання дорогих SiC-MOSFET замість IGBT.

Четверте рішення полягає у використанні dv/dt - фільтра. Він містить LC-контур, постійну часу якого можна узгодити з хвильовими параметрами кабелю. Однак для придушення коливань напруги необхідно вводити демпфуючі резистори, втрата потужності

на яких може зробити загальну ефективність рішення аналогічною до звичайного IGBT-інвертора.

П'ятим варіантом є використання багаторівневих інверторів, при цьому фактичне значення dv/dt також зменшується за рахунок збільшення кількості рівнів напруги на виході інвертора, а отже і зменшення різниці між ними. Проте багаторівневі топології є складними та потребують великої кількості напівпровідникових приладів та спеціальних законів ШІМ модуляції, тому в інверторах на середній рівень напруги доцільніше використовувати пасивні dv/dt фільтри, що потенційно можуть бути встановленими в двох місцях: на виході інвертора або на кінці кабелю, в безпосередній близькості до вхідних терміналів двигуна.

dv/dt -фільтр на терміналах двигуна. Відбиття хвиль та пов'язане з цим перевищення напруги спричинені невідповідністю між хвильовим опором кабелю та імпедансом двигуна. Фільтри, розміщені на клеммах двигуна, розробляються таким чином, щоб їх імпеданс відповідав хвильовому опору кабелю Z_c , як це відображено у (3), де Z_f - імпеданс фільтра, а C_c - погонна ємність кабелю [18]. Наприклад, якщо використовується RC-фільтр (див. рис. 1), його Z_f розраховується як у (4), де R_f та C_f - опір та ємність фільтра відповідно, а ω - кутова частота. Значення R_f має задовольняти (5), де L_c - еквівалентна зосереджена індуктивність кабелю.

$$|Z_c| = \sqrt{\frac{L_c}{C_c}} \cong |Z_f| \quad (3)$$

$$|Z_f| = \sqrt{R_f^2 + \left(\frac{1}{\omega C_f}\right)^2} \quad (4)$$

$$R_f > 2\sqrt{\frac{L_c}{C_f}} \quad (5)$$

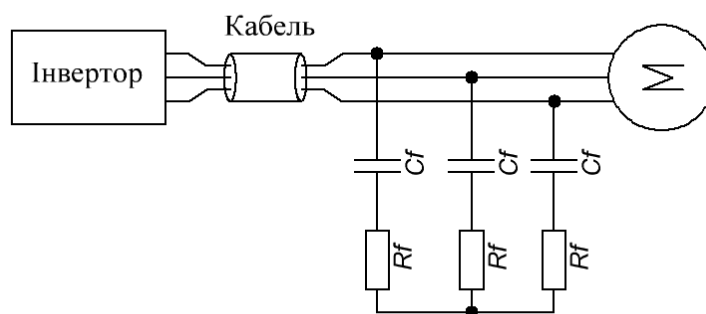


Рис. 1. RC dv/dt -фільтр розміщений на терміналах двигуна

При виконанні умови (5) отримується система з надмірним демпфуванням, завдяки чому резонансі процеси у фільтрі стають затухаючими. Основною метою dv/dt -фільтрів, розташованих на клеммах двигуна є узгодження імпедансу кабелю та імпедансу двигуна відповідно до (3).

dv/dt -фільтри на виході інвертора. Серед багатьох варіантів виконання RLC dv/dt -фільтрів зазвичай розрізняють три основних типи, які відрізняються між собою конкретним способом з'єднання R, L та C елементів всередині фільтра.

Індуктор з послідовним RC-ланцюгом (тип 1). RLC dv/dt -фільтр типу 1 складається з індуктивностей L_f , що включені послідовно з виходом інвертора, а також з послідовних ланок R_f, C_f , з'єднаних зіркою як показано на рис. 2. Розрахунок RLC-фільтра є нетривіальним завданням, але практичні рекомендації по розрахунку можна знайти в [19, 20]. На відміну від синусоїдальних фільтрів, dv/dt -фільтри мають власну резонансну частоту вище частоти ШІМ інвертора, тому резонансні ефекти не є вираженими, особливо якщо система має надмірне демпфування.

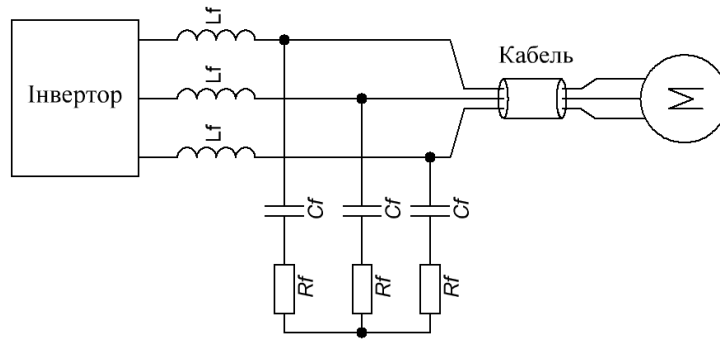


Рис. 2. RLC dv/dt -фільтр типу 1

Щоб отримати надмірно задемпфовану систему для RLC-фільтра типу 1, необхідно виконання умови (6):

$$R_f \geq 2 \sqrt{\frac{L_f}{C_f}}. \quad (6)$$

З іншого боку dv/dt можна виразити як:

$$\frac{dv}{dt} = \omega_0 V_{dc}, \quad (7)$$

де $\omega_0 = 1/\sqrt{L_f C_f}$ - власна резонансна частота LC контуру фільтра.

Формула (7) показує, що для бажаного (заданого) значення dv/dt теоретично існує безліч комбінацій значень L_f та C_f . Падіння напруги на індуктивності L_f пропорційне її імпедансу $|Z_L| = \omega L_f$, де ω - кутова частота першої гармоніки вихідної напруги інвертора, рад/с. На практиці для вибору конкретних значень можна задатися допустимою втратою напруги на фільтрі $x\%$ (у відсотках). Знаючи базову потужність S_b та базову напругу V_b системи можна визначити базовий імпеданс системи як $|Z_b| = V_b^2 / S_b$, а потім вибрати L_f так, щоб задовольнялася умова (8):

$$|Z_L| \leq \frac{x\%}{100} \cdot |Z_b|. \quad (8)$$

Резистори R_f відіграють важливу роль у даному типі фільтра, вони демпфують власні резонансні явища в LC контурі фільтра, а також обмежують початковий струм при включенні ключа в інверторі.

Індуктор з паралельним LR-ланцюгом (тип 2). Схему RLC dv/dt -фільтра типу 2 наведено на рис. 3. Його основна відмінність від фільтра типу 1 полягає у тому, що він

містить паралельно з'єднані елементи R_f, L_f . Попередній розрахунок може базуватися на (7), коли бажане значення dv/dt буде досягнуто, тоді для отримання системи з надмірним демпфуванням параметри елементів фільтра повинні задовольняти (9). Довгі кабелі з високою ємністю значно впливають на роботу фільтра, створюючи відбиті хвилі напруги з підвищеною амплітудою, що спричиняє великі втрати потужності в резисторі R_f .

$$R_f \leq \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L_f}{C_f}} \quad (9)$$

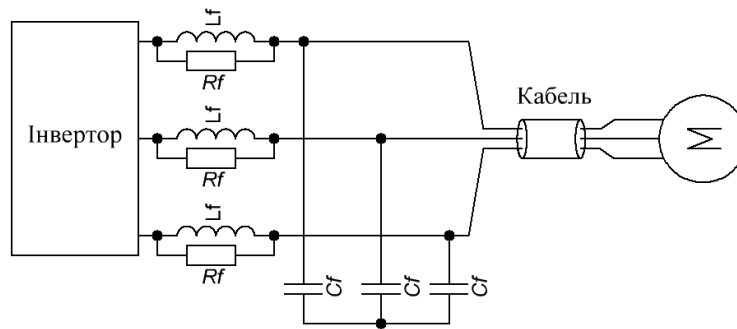


Рис. 3. RLC dv/dt -фільтр типу 2

Індуктор з паралельним RC-ланцюгом (тип 3). Схему RLC dv/dt -фільтра типу 3 наведено на рис. 4. Для розрахунку такого фільтра можна користуватися формулами (10), (11). В формулі (10) τ_{RC} - це постійна часу RC-кола ($\tau_{RC} = RC$), t_{don} та t_{doff} - відповідно затримки увімкнення та вимкнення силового ключа інвертора, t_r та t_f - відповідно час наростання та час спадання входньої напруги інвертора, який залежить від часу наростання та спадання при комутації силового ключа інвертора.

$$\tau_{RC} > (t_{don} + t_r + t_f + t_{doff}) \quad (10)$$

$$R_f \leq \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L_f + L_c}{C_c}} \quad (11)$$

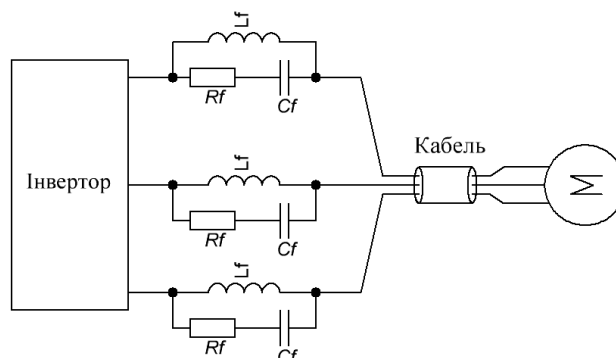


Рис. 4. RLC dv/dt -фільтр типу 3

Окрім вищезгаданих пасивних RLC фільтрів існують варіанти виконання dv/dt фільтрів, у яких перенапруга обмежується на рівні, що трохи перевищує величину напруги

ланки постійного струму V_{dc} , це досягається включенням діодного випрямляча одразу після конденсаторів фільтра C_f , як це показано на рис. 5. Для початкового вибору номіналів елементів фільтра можна користуватися формулами (7) та (8). Основною проблемою даної топології є великі струми, що протікають через резистори R_{damp} в конденсатор DC шини приводу, що в свою чергу провокує значний нагрів цих резисторів. Для обмеження цього струму величина індуктивності L_f може бути розрахована як:

$$L_f = \frac{V_{dc}}{I_{pk} \omega_0}, \quad (12)$$

де I_{pk} – бажане значення струмообмеження, А.

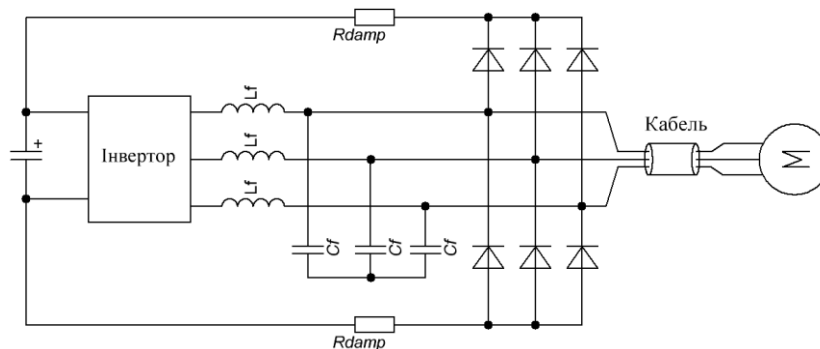


Рис. 5. Реалізація dv/dt - фільтра з обмеженням рівня перенапруги

Недоліком цього методу є необхідність використання зовнішнього трифазного випрямляча. Крім того, напруга, до якої обмежується значення перенапруги має бути близькою до номінального значення напруги ланки постійного струму приводу (наприклад $1.1V_{dc}$), в іншому разі струм через демпфуючі резистори, а отже і втрати потужності можуть бути великими, що знизить сумарний ККД системи. Також слід зазначити, що струм, який протікає через демпфуючі резистори, протікає і через ключі інвертора, створюючи додаткове навантаження, що негативно впливає на ефективність даного рішення.

Ще одним подібним рішенням є встановлення діодного випрямляча на кінці кабелю, як показано на рис. 6, основною відмінністю є відсутність LC кола на виході інвертора, що є перевагою, проте в даному випадку випрямляч повинен бути встановлений в безпосередній близькості до вхідних терміналів двигуна, також він може потребувати свого власного радіатора для охолодження (хоча в попередньому випадку випрямляч міг бути змонтований на одному радіаторі з SiC інвертором). Також недоліком є необхідність ще двох проводів для з'єднання виходу випрямляча з конденсатором ланки постійного струму інвертора. Конденсатор C_{damp} в даному випадку служить для подолання ефекту довгої лінії між випрямлячем та інвертором [21]. Слід зазначити, що в якості діодів у схемах на рис. 5-6 зазвичай використовуються швидкі SiC діоди, розраховані на відповідний клас напруги та струмів.

Висновок. У статті здійснено аналіз проблеми виникнення комутаційних перенапруг в електроприводах на основі високошвидкісних напівпровідникових ключів (SiC-MOSFET, GaN транзистори), розглянуто основні топології пасивних dv/dt -фільтрів, а також основні розрахункові співвідношення для вибору компонентів фільтра. Разом з цим висвітлено схеми обмеження перенапруги, що базуються на використанні діодних випрямлячів.

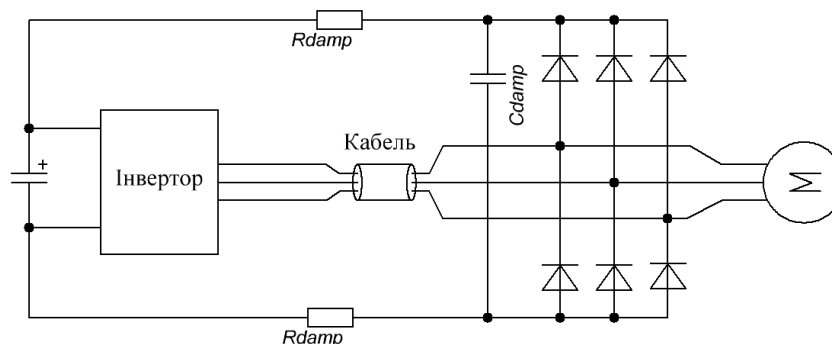


Рис. 6. Встановлення випрямляча на стороні двигуна

Показано, що використання високошвидкісних ключів у електроприводі з одного боку дозволяє покращити динамічні властивості інвертора, а з іншого - створює проблеми з перенапругою на клеммах двигуна, пов'язані з тим, що зазвичай на практиці електрична машина підключається до інвертора за допомогою кабелю.

На думку авторів, найбільш перспективними для практичного застосування у електромеханічних системах з високочастотною ШІМ є схеми пасивного RLC dv/dt -типу 1, а також комбінованого рішення з діодним обмежувачем рівня перенапруги, яке показано на рис. 5, дані рішення поєднують відносну простоту конструкції, можливість встановлення компонентів фільтра на платі інвертора, а також на спільному з інвертором радіаторі, відсутність додаткових проводів в кабелі між двигуном та інвертором (як, наприклад в рішенні на рис. 6) можливість масштабування для різних рівнів напруги та високу ефективність при правильно підібраних параметрах.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ковбаса С., Вербовий Ю., Коломійчук Є. «Порівняльний аналіз динамічних характеристик Si-MOSFET, SiC-MOSFET та Si-IGBT транзисторів». *Технічна електродинаміка*. 2025; 5: 026. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2025.05.026>.
2. Yoo A., Yoon Y.-D., Sul S.-K., Hisatune M., Morimoto S., Ide K. "Design of a Current Regulator with Extended Bandwidth for Servo Motor Drive". *2007 Power Conversion Conference*. Nagoya, Japan. 2007. p. 1308–1314. DOI: <https://doi.org/10.1109/PCCON.2007.373134>.
3. Odera F., Imamoto K., Yoshimi D., Takenaka K., Higuchi M. "Realization of High Power Density AC Servo Drive System Using GaN Power Device". *23rd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*. Hamamatsu, Japan. 2020. p. 2101–2105, DOI: <https://doi.org/10.23919/ICEMS50442.2020.9291182>.
4. She X., Huang A. Q., Lucía Ó., Ozpineci B. "Review of Silicon Carbide Power Devices and Their Applications". In *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2017; 64 (10): 8193–8205. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2652401>.
5. Hamada K., Nagao M., Ajioka M., Kawai F. "SiC—Emerging Power Device Technology for Next-Generation Electrically Powered Environmentally Friendly Vehicles". In *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2015; 62 (2): 278–285. DOI: <https://doi.org/10.1109/TED.2014.2359240>.
6. Ogawa T., Tanida A., Yamakawa T., Okamura M. "Verification of fuel efficiency improvement by application of highly effective silicon carbide power semiconductor to HV inverter". *SAE Tech*. 2016. DOI: <https://doi.org/10.4271/2016-01-1230>.
7. Kumar A., Moradpour M., Losito M., Franke W.-T., Ramasamy S., Baccoli R., Gatto G. "Wide Band Gap Devices and their Application in Power Electronics". *Energies*. 2022; 15: 9172. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15239172>.

8. Skibinski G., Leggate D., Kerkman R. “Cable characteristics and their influence on motor over-voltages”. *Proceedings of APEC 97 – Applied Power Electronics Conference*. Atlanta, GA, USA. 1997; 1: 114–121.
9. Pietrini G., Barater D., Concarri C., Galea M., Gerada C. “Closed-form approach for predicting overvoltage transients in cable-fed PWM motor drives for MEA”. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. 2016, p. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1109/ECCE.2016.7854917>.
10. Xu Y., et al., “Impact of High Switching Speed and High Switching Frequency of Wide-Bandgap Motor Drives on Electric Machines”. In *IEEE Access*. 2021; 9: 82866–82880. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3086680>.
11. He J., Sizov G. Y., Zhang P., Demerdash N. A. O. “A review of mitigation methods for overvoltage in long-cable-fed PWM AC drives”. *2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*. 2011. p. 2160–2166.
12. Scott M. J., et al., “Reflected wave phenomenon in motor drive systems using wide bandgap devices”. *2014 IEEE Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications*. 2014. p. 164–168.
13. Pastura M., Nuzzo S., Kohler M., Barater D. “Dv/Dt Filtering Techniques for Electric Drives: Review and Challenges”. *IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. Lisbon, Portugal. 2019. p. 7088–7093. DOI: <https://doi.org/10.1109/IECON.2019.8926663>.
14. Lee S., Nam K. “An overvoltage suppression scheme for AC motor drives using a half DC-link voltage level at each PWM transition”. In *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2002; 49 (3): 549–557. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2002.1005379>.
15. Luckett B., He J., Yuan X. “Investigation of SiC Current Source Inverter for Medium-Voltage High-Frequency Electric Aircraft Propulsion Applications”. *2020 IEEE 9th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC2020-ECCE Asia)*. Nanjing, China. 2020. p. 3476–3481. DOI: <https://doi.org/10.1109/IPEMCECCEAsia48364.2020.9367841>.
16. Swamy M. M., Kang J., Shirabe K. “Power Loss, System Efficiency, and Leakage Current Comparison Between Si IGBT VFD and SiC FET VFD With Various Filtering Options”. In *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2015; 51 (5): 3858–3866. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.2015.2420616>.
17. Swamy M. M., Baumgardner M. A. “New Normal Mode dv/dt Filter With a Built-In Resistor Failure Detection Circuit”. In *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2017; 53 (3): 2149–2158. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.2017.2672519>.
18. Skibinski G. “Design methodology of a cable terminator to reduce reflected voltage on AC motors”. *IAS '96. Conference Record of the 1996 IEEE Industry Applications Conference Thirty-First IAS Annual Meeting*. San Diego, CA, USA. 1996; 1: 153–161.
19. Mart-ro P., Sae-Kok W., Khomfoi S. “Analysis of dv/dt filter installation for PWM AC drive applications”. *2011 IEEE Ninth International Conference on Power Electronics and Drive Systems, Singapore*. 2011. p. 177–184. DOI: <https://doi.org/10.1109/PEDS.2011.6147243>.
20. Kim H., Kim B., Bhattacharya S. “An Analytical Design Strategy and Implementation of a Dv/Dt Filter for WBG Devices Based High Speed Machine Drives”. *IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. 2018. p. 385–390. DOI: <https://doi.org/10.1109/IECON.2018.8591737>.
21. He J., Sizov G. Y., Zhang P., Demerdash N. A. O. “A review of mitigation methods for overvoltage in long-cable-fed PWM AC drives”. *2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*. Phoenix, AZ, USA. 2011, p. 2160–2166, DOI: <https://doi.org/10.1109/ECCE.2011.6064054>.

DOI: <https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.69>

UDC 681.5:52

The phenomenon of switching overvoltage in electric drives based on high-speed switches, problem statement and review of its solution options

Serhii M. Kovbasa¹⁾

PhD, Associate Professor, Head of the Department of Automation of Electromechanical Systems and Electric Drives

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2954-455X>; skovbasa@ukr.net

Yurii V. Verbovyi¹⁾

PhD Student of the Department of Automation of Electromechanical Systems and Electric Drives

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-7032-9536>; yurii.verbovyi@gmail.com

¹⁾ National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Beresteyskyi Ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine

ABSTRACT

The article considers the problem of voltage overshoots at motor terminals in electric drives which use high-speed semiconductor devices (in particular SiC-MOSFET and GaN transistors) in its invertors. It is shown that the use of wide band gap semiconductors allows to significantly increase the frequency of pulse-width modulation, improve the dynamic properties of the inverter and reduce the size of the converter itself. At the same time, the high switching speed produces overvoltage at the motor terminals and uneven voltage distributions across stator windings due to high rate of voltage change over time (dv/dt), which causes accelerated aging of the insulation and can lead to premature failure of the electric machine. A review of the main approaches to reducing or preventing the manifestation of this phenomenon is carried out, including: the use of sinusoidal and RLC filters of various topologies, the main purpose of which is to match the wave parameters of the cable with its load (motor), the use of multilevel inverters, as well as specialized circuits with diodes to limit the overvoltage level. The results of the work can be used to help with the design of modern high dynamic electric drives.

Keywords: Filter dv/dt -; overvoltage; wide band gap semiconductors; high-frequency PWM; electric drive; power electronics; SiC-MOSFET; Si-IGBT; GaN transistor