

діодів, Mosfet і IGBT-транзисторів на базі кремнію і карбіду кремнію показав високу перспективність даної технології, а саме:

- енергія включення транзисторів на базі карбіду кремнію в порівнянні з традиційними кремнієвими транзисторами в 3...4 рази менше;
- енергія виключення в 3...6 разів менше;
- енергія відновлення зворотного діода в 20...40 разів менше;
- статичні втрати потужності (падіння напруги на транзисторі у включеному стані в два рази менше);
- вартість транзисторів на базі карбіду кремнію вище на 5...15 % відносно традиційних кремнієвих транзисторів;
- зниження часу перемикання транзисторів веде до зниження динамічних втрат, що в свою чергу веде до значного збільшення максимально можливої частоти комутації силових ключів, зниження втрат і підвищення ККД;
- значно менші масогабаритні показники SiC транзисторів, що є досить значною перевагою для електромобілів, авіації і т. п.

[1] Sadow, S. E., Agarwal, A. *Advances in Silicon Carbide Processing and Applications. Inc.* 2004.

[2] Gevorkyan, E. S., Rucki, M., Kagramanyan, A. A., Nerubatskiy, V. P. Composite material for instrumental applications based on micro powder  $Al_2O_3$  with additives nano-powder SiC. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2019. Vol. 82. P. 336–339. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2019.05.010.

[3] Dey, R., Nath, S. Replacing silicon IGBTs with SiC IGBTs in medium voltage wind energy conversion systems. *2016 7th India International Conference on Power Electronics (IICPE)*. 2016. DOI: 10.1109/iicpe.2016.8079408.

**УДК 621.314**

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ТОПОЛОГІЇ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ТЯГОВИХ ТРИФАЗНИХ ІНВЕРТОРІВ НАПРУГИ**

## **RESEARCH OF TOPOLOGY OF ENERGY EFFICIENT TRACTION THREE-PHASE VOLTAGE INVERTERS**

*канд. техн. наук О.І. Семененко, М.М. Одєгов,  
канд. техн. наук Ю.О. Семененко, канд. техн. наук О.Д. Супрун  
Український державний університет залізничного транспорту (м. Харків)*

*O.I. Semenenko, PhD (Tech.), M.M. Odiehov,  
Y.O. Semenenko, PhD (Tech.), O.D. Suprun, PhD (Tech.)  
Ukrainian State University of Railway Transport (Kharkiv)*

Впровадження швидкодіючих силових ключів на базі *IGBT* забезпечило зростання рівня енергоефективності тягових інверторів рухомого складу за рахунок суттєвого підняття частоти перемикань. Щоправда при цьому динамічні втрати в *IGBT* зростають, знижуючи навантажувальні можливості силових ключів, також виникають круті фронти вихідної напруги перетворювача [1, 2], спричиняючи прискорене старіння ізоляції тягових двигунів і шкідливе електромагнітне випромінювання. Щоб знизити втрати в *IGBT* та обмежити швидкість зростання напруги  $du/dt$  і струму  $di/dt$

використовують ланки комутаційного захисту – снабери. Використання дисипативних елементів, які розсіюють енергію, накопичену реактивними елементами снаберів, призводить до значних втрат в ключах і зниження ККД перетворювача.

Можна усунути ці недоліки застосуванням вузлів одноопераційної комутації (ВК) в інверторах напруги [1], що забезпечують реалізацію м'якої комутації силових *IGBT* при нульовій напрузі (*zero-voltage-switching* [3-4]). У цих перетворювачах використовуються бездисипативні снабери, адже алгоритм керування ВК передбачає, що накопичену під час комутації (вимикання *IGBT*) реактивними елементами енергію не розсіюють, вона до наступної комутації повертається до силової ланки.

У першому варіанті топології інвертора (рис. 1, а) фазні ВК на швидкодіючих *IGBT* приєднані до штучної нульової точки (рис. 1, б), що утворена ємнісним дільником напруги [1, 5]. Через асиметрію імпульсів струму ВК інвертора можливий відхід потенціалу нульової точки, що потребує прийняття додаткових заходів для вирівнювання напруги. У другому варіанті [1] замість ємнісного дільника напруги використовується буферний *LC* фільтр у кожному фазному ВКФ (рис. 1, в-г), конденсатори яких повинні мати достатню ємність для стабільного живлення ВК під час процесу підготовки ключа до наступного вмикання при нульовій напрузі.

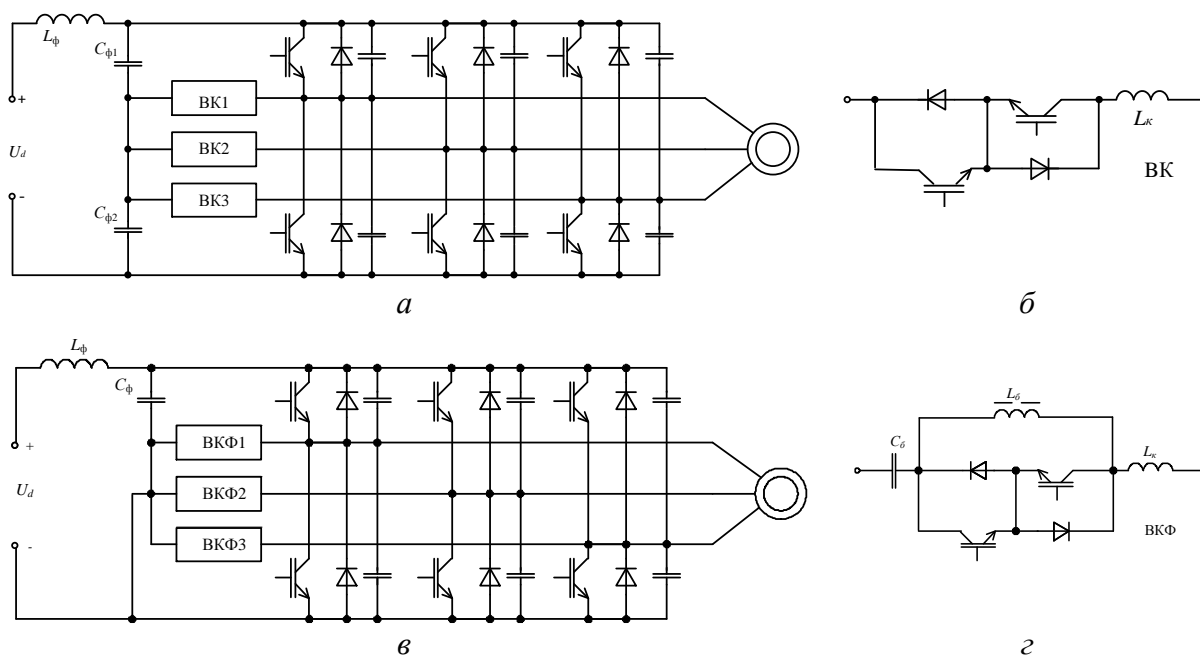


Рис. 1 Варіанти топології тягового трифазного інвертора напруги з ВК

Як бачимо, обоє варіанти топології інвертора напруги з ВК мають свої переваги та свої складнощі у застосуванні. Для вибору кращого варіанту були проведені дослідження надійності реалізації м'якої комутації в силових ключах у різних режимах роботи та проведена оцінка енергетичної ефективності тягового трифазного інвертора напруги з різними ВК на підвищених частотах ШІМ.

Аналітичні дослідження та імітаційне моделювання у пакеті *MATLAB* показало наступне: у ВК трифазного інвертора напруги слід застосовувати чотириквADRантні ключі на *IGBT*, що знімає обмеження діапазону регулювання тривалості імпульсів вихідної напруги; перший варіант топології інвертора напруги має суттєво вищу надійність реалізації м'якої комутації у порівнянні з другим при використанні доопрацьованої схеми живлення ВК; реалізація режиму м'якої комутації у ключах з ВК суттєво покращує масогабаритні показники, енергетичну ефективність тягових перетворювачів та підвищує надійність їх роботи.

- [1] Статичні перетворювачі тягового рухомого складу: Навч. посібник/ Ю.П. Гончаров, М.В. Панасенко, О.І. Семененко, М.В. Хворост/ За ред. Гончарова Ю.П. – Харків, НТУ „ХПІ”, 2007. – 192 с.
- [2] Семененко А.И. Улучшение характеристик бортовых систем питания электроподвижного состава. Дис. канд. техн. наук: 05.22.09. – Харьков, 2003. –179 с.
- [3] He N, Zhu Y, Xu D. Zero-voltage-switching SPWM method for three-phase four-wire inverter. In: Proceedings of IEEE applied power electronics conference, Tampa, USA, 26-30 March 2017, pp. 3436-3443.
- [4] Deng J, Shi K, Zhao A et al. A universal zero-voltage-switching technique for multi-phase AC/DC converter. In: Proceedings of IEEE applied power electronics conference, USA, 17-21 March 2019, pp. 1204-1211.
- [5] Семененко О.І. Реалізація м'якої комутації в силових ключах тягових перетворювачів електрорухомого складу/ О.І. Семененко, М.М. Одегов, Ю.О. Семененко, О.Д. Супрун //Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті: 32-а міжнародна науково-практична конференція 2019 р.– Харків: УкрДУЗТ. – 2019. – №4 (Додаток). – С. 66-68.

**УДК 629.4-592**

**СТРАТЕГІЯ ОПТИМАЛЬНОГО ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГІЇ  
РЕКУПЕРАТИВНОГО ГАЛЬМУВАННЯ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ  
ТЯГИ**

**STRATEGY OPTIMAL USE OF ENERGY OF REGENERATIVE BRAKING IN  
ELECTRIC TRACTION NETWORK**

*А.М. Сидоренко, канд. техн. наук С.І. Яцько,  
канд. техн. наук Я.В. Ващенко*

*Український державний університет залізничного транспорту (м. Харків)*

*A. Sydorenko, S. Yatsko, PhD (Tech.),  
Y. Vashchenko, PhD (Tech.)*

*Ukrainian State University of Railway Transport (Kharkiv)*

На даний час основним інструментом скорочення тягових енерговитрат міського та приміського електричного транспорту є запровадження ефективного використання рекуперативного гальмування. За різними підрахунками його безбар'єрне використання, дозволяє досягти економії електроенергії від 15% до 40% загальних витрат на тягу (рис. 1, 2) [1].