

5. Saveliev O. G. *Atlas of Clouds: Textbook*. Zaporizhzhia, 2015. 20 p. URL: https://web.archive.org/web/20181221121812/http://shron1.chtyvo.org.ua/Saveliev_Oleksandr/Atlas_khmar.pdf (accessed 10.02.2025). (Ukr).

6. On the Approval of the Rules for Meteorological Support of Flights of State Aviation of Ukraine. The Official Web Portal of the Parliament of Ukraine. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/z126415?utm_source=chatgpt.com#Text (accessed 11.02.2025). (Ukr).

УДК 681.5:52

Вербовий Ю. В., аспірант, ORCID 0009-0001-7032-9536,
науковий керівник: д-р техн. наук, доцент **С. М. Ковбаса**,
Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

ПЕРСПЕКТИВА ЗАМІНИ КРЕМНІЄВИХ IGBT НА КАРБІД КРЕМНІЄВІ MOSFET В АВТОНОМНИХ ІНВЕРТОРАХ НАПРУГИ ТА СТРУМУ В СКЛАДІ СУЧАСНИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ ДЛЯ ПОЛПШЕННЯ ЇХ ДИНАМІЧНИХ ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ВИСОКОЧАСТОТНОЇ ШІМ

PROSPECTS OF REPLACEMENT OF SILICON IGBT WITH SILICON CARBIDE MOSFET IN AUTONOMOUS VOLTAGE AND CURRENT INVERTERS IN MODERN ELECTROMECHANICAL SYSTEMS TO IMPROVE THEIR DYNAMIC AND ENERGY PERFORMANCES IN CASE OF USING HIGH-FREQUENCY PWM

***Анотація.** В роботі наведено огляд основних фізичних та електричних характеристик напівпровідникових матеріалів кремнію та карбіду кремнію які використовуються для виготовлення сучасних силових напівпровідникових приладів. Використовуючи раніше розроблену та виготовлену експериментальну установку для тесту подвійним імпульсом (Double-Pulse Test, DPT), для різних струмів комутації проведено тестування процесів переключання транзисторів. В результаті аналізу проведених тестів показано, що за інших рівних умов SiC-MOSFET забезпечує найменші втрати на перемикання, що свою чергу робить цей тип транзисторів найбільш придатним для використання у застосуваннях з високою частотою широтно-імпульсної модуляції. Показано, що використання SiC-MOSFET потенційно може забезпечити зменшення мертвого часу перетворювача у порівнянні з Si-IGBT, що в свою чергу дозволить покращити динамічні властивості автономних інверторів напруги та спростити або повністю відмовитися від застосування алгоритмів компенсації мертвого часу. Результати виконаних досліджень можуть бути використані при розробці силових напівпровідникових перетворювачів електроприводів різних типів або статичних перетворювачів параметрів електричної енергії. Бібл. 16, рис. 3, табл. 2.*

***Ключові слова:** напівпровідники з широкою забороненою зоною, тест подвійним імпульсом, силова електроніка, SiC-MOSFET, Si-IGBT, втрати на перемикання, високочастотна ШІМ.*

***Abstract** The paper provides an overview of the main physical and electrical characteristics of silicon and silicon carbide semiconductor materials which are used for manufacturing modern*

power semiconductor devices. Using a previously developed experimental setup for the Double-Pulse Test (DPT), transistor switching processes were tested for different switching currents. As a result of the analysis of the tests, it is shown that SiC-MOSFET provides the lowest switching losses, which in turn makes this type of transistor the most suitable for use in applications with high pulse-width modulation frequency. It is shown that the use of SiC-MOSFET can potentially provide a reduction in the dead time of the converter compared to Si-IGBT, which in turn will allow improving the dynamic properties of autonomous voltage inverters and simplifying or completely abandoning the use of dead time compensation algorithms. The results of the research can be used in the development of power semiconductor converters for electric drives of various types or static converters of electrical energy parameters. Ref. 16, Fig. 3, Tabl. 2.

Keywords: wide bandgap semiconductors, double pulse test, power electronics, SiC-MOSFET, Si-IGBT, switching losses, high-frequency PWM.

Вступ. Стрімкий розвиток напівпровідникової перетворювальної техніки, який відбувається в наш час з метою підвищення її енергетичних та зменшення масогабаритних показників, нерозривно пов'язаний з постійним вдосконаленням елементної бази, а саме силових напівпровідникових приладів які є основою будь-якої топології сучасного перетворювача. Сьогодні великі інвестиції та дослідницькі зусилля спрямовані на розробку нових та покращення існуючих структур силових пристроїв на основі напівпровідників з широкою забороненою зоною (Wide-Bandgap, WBG), одним з яких є карбід кремнію (SiC). Електричні та фізичні властивості SiC роблять його перспективним матеріалом 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 [1], приводах електричних літальних апаратів, а також в статичних перетворювачах параметрів електричної енергії різного технологічного призначення [2, 3]. У порівнянні з кремнієвими напівпровідниками, WBG мають на декілька порядків вищі швидкості перемикання, що робить їх придатними для роботи при високій частоті широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), що в свою чергу призводить до зменшення габаритів моторних виробів, а також до збільшення питомої потужності напівпровідникових перетворювачів [4, 5].

Мета та завдання дослідження. Метою роботи є огляд основних фізичних та електричних характеристик кремнію та карбід кремнію, а також порівняння експериментально-визначених динамічних та енергетичних показників процесів перемикання SiC-MOSFET та Si-IGBT при роботі на активно-індуктивне навантаження, так як саме в цьому режимі транзистори зазвичай працюють в електроприводах та статичних перетворювачах параметрів електричної енергії.

Матеріал та результати дослідження. WBG матеріали мають ширину забороненої зони понад 3 еВ, що забезпечує високу допустиму напруженість електричного поля — близько 3 МВ/см, що в 10 разів перевищує показник кремнію, це дозволяє напівпровідниковим приладам на основі WBG працювати на більших напругах (табл. 1) [6]. Крім того, SiC має вищу

мобільність електронів в порівнянні з кремнієм, що створює передумови для його використання при високій частоті комутації. Окрім електричних характеристик, важливими для силових напівпровідникових приладів є теплові властивості. SiC має суттєві переваги щодо теплопровідності та температури плавлення порівняно з кремнієм. На відміну від транзисторів на основі карбиду кремнію, що наближаються до межі можливостей матеріалу, проте все ще має мають потенціал для вдосконалення, комерційно-доступні пристрої на основі кремнію вже досягли межі, що визначається електричними та фізичними властивостями матеріалу, але для подолання цієї межі виробниками запропоновано архітектуру MOSFET на основі супер-переходу (*Super-Junction* MOSFET) [7].

Таблиця 1. Порівняння основних властивостей напівпровідникових матеріалів

Властивість	Кремній (Si)	Карбід кремнію (SiC)
Ширина забороненої зони, еВ	1,12	3,2
Допустима напруженість електричного поля, кВ/см	300	3500
Швидкість електронів, 10^7 см/с	1	2
Мобільність електронів, $\text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$	1300	950
Мобільність дірок, $\text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$	600	115
Теплопровідність, Вт/см \cdot К	1,5	3,8
Температура плавлення, К	1412	3103

Кремнієві силові MOSFET зазвичай працюють на частотах до 500 кГц і відносно низькому діапазоні напруг (нижче 1 кВ) та перекривають діапазон потужності 10-20 кВт. Роботи з поліпшення показників Si-MOSFET тривають, до прикладу для більш повного використання властивостей кремнію ще у 1999 році компанія Infineon Technologies представила серію MOSFET CoolMOS™ Superjunction. Ці транзистори добре підходять для застосування в імпульсних джерелах живлення, активних коректорах коефіцієнта потужності, та інших топологіях де відбувається жорстке перемикання ключів [8].

IGBT, як правило, працюють на нижчій частоті (в більшості до 30 кГц), проте при порівняно високій нарузі (діапазон від, приблизно, 600 В до декількох кіловольт), забезпечуючи при цьому найвищі рівні потужності від одиниць кВт до 1 МВт. IGBT широко використовуються у силових схемах частотних перетворювачів для електроприводу, активних фільтрів, імпульсних перетворювачів постійної напруги тощо [9]. IGBT випускаються на напругу до 6,5 кВ (наприклад, IGBT-модуль типу 5SNA 0750G650300 компанії ABB) та струм до 3,6 кА (наприклад, IGBT-модуль типу 5SNA 3600E170300 компанії ABB).

SiC-MOSFET витісняють кремнієві MOSFET у високочастотних (80 кГц – 10 МГц) та водночас високовольтних застосуваннях. Одним із прикладів сучасних SiC MOSFET є сімейство Infineon CoolSiC [10] з транзисторами, що доступні в класах 650 В, 1200 В і 1700 В.

Через складність математичної моделі яка могла б враховувати особливості комутації транзисторів у складі реального перетворювача [11], для визначення динамічних показників можна використати практичний підхід, зокрема метод тесту подвійним імпульсом (*Double-Pulse Test, DPT*), який є поширеним методом для експериментального визначення динамічних характеристик силових MOSFET та IGBT.

Зазвичай у технічній документації надається детальна інформація про напівпровідниковий прилад, яка отримана за певних, попередньо визначених тестових умов. Однак режим роботи приладу в конкретному застосуванні може значно відрізнятись від тестових умов, наведених у документації. Метод DPT дозволяє визначити динамічні характеристики силового напівпровідникового приладу в умовах, які специфічними для конкретного застосування. Крім того, цей метод дає змогу експериментально оцінити характер перехідних процесів в колі драйвера затвора та у силових колах, що особливо важливо при розробці та налагодженні силових перетворювачів, що побудовані на базі високошвидкісних ключів [12]. Експериментальна установка для визначення динамічних характеристик транзисторів за методом DPT складається з високовольтного регульованого джерела живлення, генератора імпульсів, гальванічно-ізолюваного двополярного джерела для живлення драйвера затвора. З детальним описом одного зі варіантів схемотехнічної реалізації та загальною методикою тестування можна ознайомитись в [13, 14]. Для порівняння динамічних та енергетичних властивостей були обрані IGBT типу NGTB50N120FL2WAG [15] та SiC-MOSFET типу IMZ120R030M1H [16], їх статичні та динамічні параметри наведено в табл. 2. Вибір транзисторів обумовлений тим, що вони мають однаковий клас напруги та приблизно однаковий робочий струм.

Таблиця 2. Статичні та динамічні параметри порівнюваних транзисторів

Транзистор	SiC-MOSFET IMZ120R030M1H	IGBT NGTB50N120FL2WAG
Виробник	Infineon	ON Semiconductor
Максимальна робоча напруга, В	1200	1200
Допустимий струм, А при $T_c = 25\text{ }^\circ\text{C}$	56	50
Опір каналу у відкритому стані, мОм	42	-
Напруга насичення колектор-емітер, В	-	2,6
Допустима напруга керування, В	0...18	± 20
Вхідна ємність, пФ	2120	7500
Вихідна ємність, пФ	116	136
Прохідна ємність, пФ	13	230
Повний заряд затвора, нКл	63	313

Всі тести транзисторів проведено при нарузі 540 В, так як цей рівень напруги є номінальним для ланки постійного струму приводів та статичних перетворювачів, що живляться від промислової трифазної мережі 380 В, змінюючи значення комутуваного струму. В результаті тестування транзисторів за методикою DPT для загальної оцінки швидкодії та

енергетичних показників процесу переключення було визначено наступні залежності як функції комутованого струму i_d : час вмикання $t_{on} = f(i_d)$, енергію втрат на вмикання $E_{on} = f(i_d)$, час вимикання $t_{off} = f(i_d)$, енергію втрат на вимикання $E_{off} = f(i_d)$, затримки вимкнення $t_{d(off)} = f(i_d)$ та увімкнення $t_{d(on)} = f(i_d)$, графіки відповідних залежностей наведено на рис. 1–3.

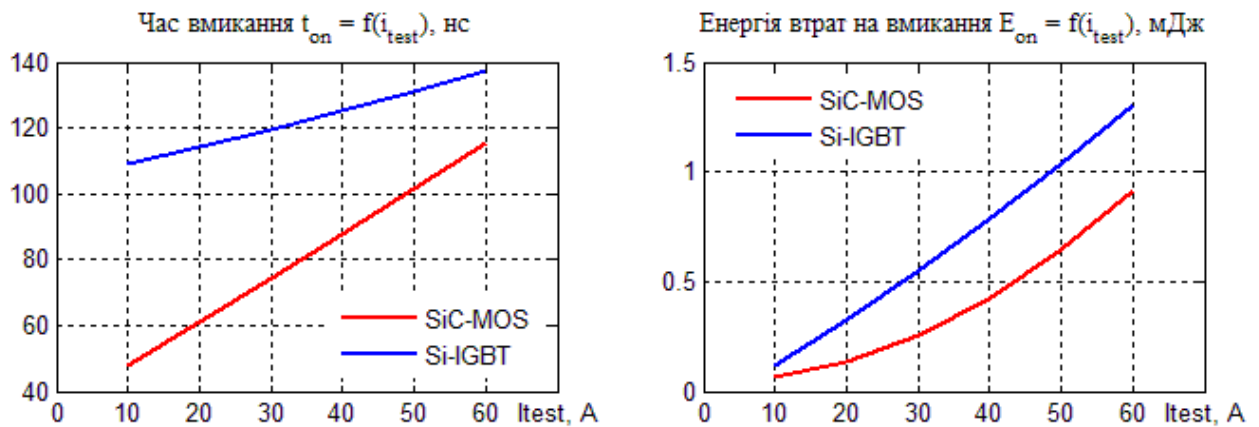


Рисунок 1. Графік залежності часу вмикання та енергії втрат на вмикання від комутованого струму

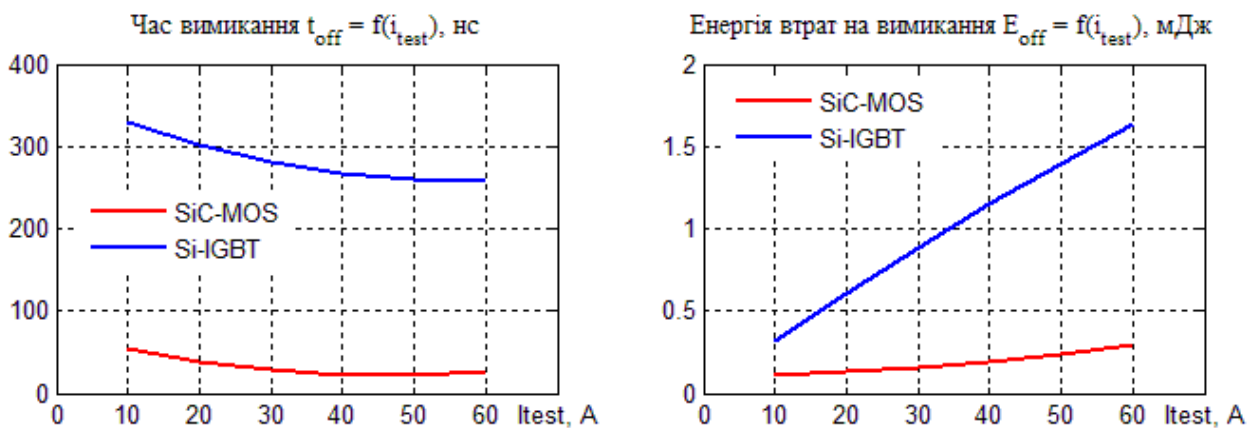


Рисунок 2. Графік залежності часу вимикання та енергії втрат на вимикання від комутованого струму

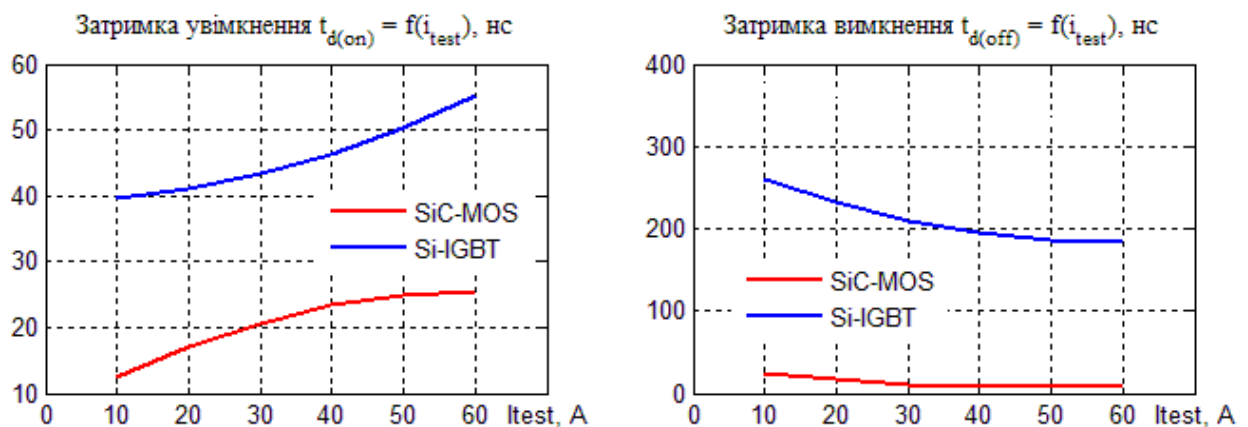


Рисунок 3. Графік залежності затримок вимкнення та увімкнення від комутованого струму

Висновки. Використовуючи метод тесту подвійним імпульсом визначено динамічні та енергетичні показники SiC-MOSFET типу IMZ120R030M1H та Si-IGBT типу NGTB50N120FL2WAG.

В результаті аналізу експериментальних даних отримано залежності (як функції комутованого струму i_d), що характеризують енергетичні та часові характеристики процесу переключення транзисторів.

Як наведено на рис. 1 та рис. 2, SiC-MOSFET у порівнянні з кремнієвим IGBT, має менші динамічні втрати на включення та відключення, а також найменше значення часу вмикання та вимикання, що свою чергу робить цей тип транзисторів найбільш придатним для використання у застосуваннях з високою частотою ШІМ.

На рис. 3 наведено, що SiC-MOSFET у порівнянні з кремнієвим IGBT має найменші затримки вимкнення та увімкнення завдяки чому з'являється можливість зменшити значення мертвого часу в фазній стійці інвертора, що в свою чергу дозволить підвищити точність відпрацювання завдання напруги або струму автономними інверторами напруги та струму відповідно (як наслідок зменшення мертвого часу можна спростити або відмовитися від алгоритму компенсації мертвого часу), а також показники якості систем векторного керування двигунами змінного струму, побудованих на їх основі.

Результати виконаних досліджень можуть бути використані при розробці силових напівпровідникових перетворювачів електроприводів різних типів або статичних перетворювачів параметрів електричної енергії.

Список використаних джерел

1. X. Liu, M. Hofmann, F. Streit and M. Maerz, "Digital Twin for Intelligent and SiC-based Drive Systems", 2021 11th International Electric Drives Production Conference (EDPC), Erlangen, Germany, 2021, pp. 1–8, DOI: 10.1109/EDPC53547.2021.9684201.
2. M. Buffolo et al., "Review and Outlook on GaN and SiC Power Devices: Industrial State-of-the-Art, Applications, and Perspectives", in IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 71, No. 3, pp. 1344–1355, March 2024, DOI: 10.1109/TED.2023.3346369.
3. W. Taha, P. Azer, A. D. Callegaro and A. Emadi, "Multiphase Traction Inverters: State-of-the-Art Review and Future Trends", in IEEE Access, vol. 10, pp. 4580–4599, 2022, DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3141542.
4. X. Deng, M. A. S. Mohamed, S. Lambert and B. Mecrow, "Development of a High-Speed, Permanent Magnet, SiC Based Drive With Integrated Input Filters," in IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 35, No. 2, pp. 863–874, June 2020, DOI: 10.1109/TEC.2020.2973449.
5. X. Yuan, I. Laird and S. Walder, "Opportunities, Challenges, and Potential Solutions in the Application of Fast-Switching SiC Power Devices and Converters," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 36, No. 4, pp. 3925–3945, April 2021, DOI: 10.1109/TPEL.2020.3024862.
6. Ciechonski, Rafal. "Growth and characterization of SiC and GaN". (2007).
7. G. Iannaccone, C. Sbrana, I. Morelli and S. Strangio, "Power Electronics Based on Wide-Bandgap Semiconductors: Opportunities and Challenges", in IEEE Access, vol. 9, pp. 139446–139456, 2021, DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3118897.
8. CoolMOS™ SJ MOSFETs benefits in hard and soft switching SMPS topologies. Semiconductor & System Solutions – Infineon Technologies. URL: <https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-Product>

Brochure_CoolMOS_Benefits_in_Hard_Soft_Switching-ProductBrochure-v07_01-EN.pdf?fileId=db3a3043338c8ac80133aca62ba63047 (дата звернення 27.01.2025).

9. Khanna V. K. (2003), *The Insulated gate bipolar transistor (IGBT): theory and design*, ISBN: 978-0-471- 23845-4, Wiley-IEEE Press, Hoboken, NJ, USA.

10. Technology Details – Infineon Technologies. *Semiconductor & System Solutions – Infineon Technologies*. URL: <https://www.infineon.com/cms/en/product/technology/silicon-carbide-sic/technology-details/> (дата звернення 19.01.2025).

11. Василець С., Василець К. Удосконалення математичної моделі IGBT транзистора з урахуванням нелінійності ємностей переходів. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*. 2018. № 1. С. 9–14.

12. B. Mondal, R. T. Pogulaguntla and A. K. B, “Double Pulse Test Set-up: Hardware Design and Measurement Guidelines”, 2022 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), Jaipur, India, 2022, pp. 1–6, DOI: 10.1109/PEDES56012.2022.10080339.

13. Q. Zhang, R. Wang and Y. Chen, “Design of a Double Pulse Test Platform for Switching Devices”, 2022 IEEE 3rd China International Youth Conference on Electrical Engineering (CIYCEE), Wuhan, China, 2022, pp. 1–5, DOI: 10.1109/CIYCEE55749.2022.9959070.

14. Double Pulse Testing Power Semiconductor Devices with Oscilloscope & AFG. *Test- und Messgeräte | Tektronix*. URL: <https://www.tek.com/en/documents/application-note/double-pulse-test-tektronix-afg31000-arbitrary-function-generator> (дата звернення 24.12.2024).

15. NGTB50N120FL2WAG IGBT – Field Stop II / 4 Lead. URL: <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/ngtb50n120fl2wa-d.pdf> (дата звернення 19.05.2024).

16. IMZ120R030M1H CoolSiC™ 1200V SiC Trench MOSFET Silicon Carbide MOSFET. *Semiconductor & System Solutions – Infineon Technologies*. URL: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IMZ120R030M1H-DataSheet-v02_02-EN.pdf?fileId=5546d46269e1c019016a92fdcc776696 (дата звернення 25.12.2024).

References

1. X. Liu, M. Hofmann, F. Streit and M. Maerz, “Digital Twin for Intelligent and SiC-based Drive Systems”, 2021 11th International Electric Drives Production Conference (EDPC), Erlangen, Germany, 2021, pp. 1–8, DOI: 10.1109/EDPC53547.2021.9684201.

2. M. Buffolo et al., “Review and Outlook on GaN and SiC Power Devices: Industrial State-of-the-Art, Applications, and Perspectives”, in *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 71, No. 3, pp. 1344–1355, March 2024, DOI: 10.1109/TED.2023.3346369.

3. W. Taha, P. Azer, A. D. Callegaro and A. Emadi, “Multiphase Traction Inverters: State-of-the-Art Review and Future Trends”, in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 4580–4599, 2022, DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3141542.

4. X. Deng, M. A. S. Mohamed, S. Lambert and B. Mecrow, “Development of a High-Speed, Permanent Magnet, SiC Based Drive With Integrated Input Filters,” in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 35, No. 2, pp. 863–874, June 2020, DOI: 10.1109/TEC.2020.2973449.

5. X. Yuan, I. Laird and S. Walder, “Opportunities, Challenges, and Potential Solutions in the Application of Fast-Switching SiC Power Devices and Converters”, in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 36, No. 4, pp. 3925–3945, April 2021, DOI: 10.1109/TPEL.2020.3024862.

6. Ciechonski, Rafal. “Growth and characterization of SiC and GaN”. (2007).

7. G. Iannaccone, C. Sbrana, I. Morelli and S. Strangio, “Power Electronics Based on Wide-Bandgap Semiconductors: Opportunities and Challenges”, in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 139446–139456, 2021, DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3118897.

8. CoolMOS™ SJ MOSFETs benefits in hard and soft switching SMPS topologies. Semiconductor & System Solutions – Infineon Technologies. URL: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-ProductBrochure_CoolMOS_Benefits_in_Hard_Soft_Switching-ProductBrochure-v07_01-EN.pdf?fileId=db3a3043338c8ac80133aca62ba63047 (accessed 27.01.2025).
9. Khanna V. K. (2003), The Insulated gate bipolar transistor (IGBT): theory and design, ISBN: 978-0-471- 23845-4, Wiley-IEEE Press, Hoboken, NJ, USA.
10. Technology Details – Infineon Technologies. *Semiconductor & System Solutions – Infineon Technologies*. URL: <https://www.infineon.com/cms/en/product/technology/silicon-carbide-sic/technology-details/> (accessed 19.01.2025).
11. Vasylets S., Vasylets K. Improvement of the mathematical model of the IGBT transistor taking into account the nonlinearity of the junction capacitances. Bulletin of the Mykhailo Ostrogradskyi National University of Kyiv. 2018. No. 1. pp. 9–14. (Ukr).
12. B. Mondal, R. T. Pogulaguntla and A. K. B, “Double Pulse Test Set-up: Hardware Design and Measurement Guidelines”, 2022 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), Jaipur, India, 2022, pp. 1–6, DOI: 10.1109/PEDES56012.2022.10080339.
13. Q. Zhang, R. Wang and Y. Chen, “Design of a Double Pulse Test Platform for Switching Devices”, 2022 IEEE 3rd China International Youth Conference on Electrical Engineering (CIYCEE), Wuhan, China, 2022, pp. 1–5, DOI: 10.1109/CIYCEE55749.2022.9959070.
14. Double Pulse Testing Power Semiconductor Devices with Oscilloscope & AFG. *Test- und Messgeräte | Tektronix*. URL: <https://www.tek.com/en/documents/application-note/double-pulse-test-tektronix-afg31000-arbitrary-function-generator> (accessed 24.12.2024).
15. NGTB50N120FL2WAG IGBT – Field Stop II / 4 Lead. URL: <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/ngtb50n120fl2wa-d.pdf> (accessed 19.05.2024).
16. IMZ120R030M1H CoolSiC™ 1200V SiC Trench MOSFET Silicon Carbide MOSFET. Semiconductor & System Solutions – Infineon Technologies. URL: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IMZ120R030M1H-DataSheet-v02_02-EN.pdf?fileId=5546d46269e1c019016a92fdcc776696 (accessed 25.12.2024).

УДК 621.31.

Шерстньов Ю. В., аспірант, ORCID 0009-0003-3210-5552,
науковий керівник: канд. техн. наук, доцент **Ю. Г. Осадчук**,
Криворізький Національний Університет

АДАПТИВНЕ КЕРУВАННЯ КОМПЕНСАТОРАМИ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ПІДПРИЄМСТВ ГІРНИЧОЗБАГАЧУВАЛЬНОГО КОМБІНАТУ

ADAPTIVE CONTROL OF REACTIVE POWER COMPENSATORS OF THE MINING AND ENTREPRENEURS PLANT

Анотація. У статті представлено результати моделювання адаптивної системи компенсації реактивної потужності гірничозбагачувального підприємства. Модель базується на вдосконалених принципах моніторингу і контролю енергоспоживанням на підстанціях гірничозбагачувальних підприємств при розбудові кіберфізичної системи. Проаналізовано добові та річні дані обсягів споживання електричної енергії. Запропоновано інноваційний підхід до моніторингу та оптимізації енергетичних потоків,