

всмоктування), та на розробку алгоритмів адаптивного керування, які враховують специфічні особливості кожної установки.

Список використаних джерел

1. Yilmaz, Ismail Cengiz, and Deniz Yilmaz. "Optimal capacity for sustainable refrigerated storage buildings". *Case Studies in Thermal Engineering* 22 (2020): 100751. URL: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100751> (дата звернення 25.03.2025).
2. Cui, Weilin, et al. "Review of suction valve capacity regulation technology in reciprocating compressor". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 213 (2025): 115435. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115435> (дата звернення 25.03.2025).
3. Feng, Yiwei, et al. "Energy-saving control method for NH₃-CO₂ cascade refrigeration system by directly regulating slide valve position in twin-screw compressor". *Applied Thermal Engineering* 239 (2024): 122116. URL: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.122116> (дата звернення 25.03.2025).

References

1. Yilmaz, Ismail Cengiz, and Deniz Yilmaz. "Optimal capacity for sustainable refrigerated storage buildings". *Case Studies in Thermal Engineering* 22 (2020): 100751. URL: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100751> (accessed 25.03.2025).
2. Cui, Weilin, et al. "Review of suction valve capacity regulation technology in reciprocating compressor". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 213 (2025): 115435. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115435> (accessed 25.03.2025).
3. Feng, Yiwei, et al. "Energy-saving control method for NH₃-CO₂ cascade refrigeration system by directly regulating slide valve position in twin-screw compressor". *Applied Thermal Engineering* 239 (2024): 122116. URL: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.122116> (accessed 25.03.2025).

УДК 621.316.9

Наталич В. О., аспірант, ORCID 0000-0003-0242-626X,
науковий керівник: д-р техн. наук, професор **В. А. Попов**,
канд. техн. наук, доцентка **О. С. Ярмолюк**,
Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

ОБГРУНТУВАННЯ МІСЦЬ РОЗМІЩЕННЯ ДИСТАНЦІЙНО КЕРОВАНИХ КОМУТАЦІЙНИХ АПАРАТІВ В УМОВАХ ДИНАМІЧНОГО КЕРУВАННЯ РЕЖИМАМИ РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖ

JUSTIFICATION OF THE PLACEMENT OF REMOTELY CONTROLLED SWITCHING DEVICES UNDER DYNAMIC MODE CONTROL OF DISTRIBUTION NETWORKS

Анотація. У статті розглядаються питання, пов'язані з вибором оптимальних місць встановлення дистанційно керованих комутаційних апаратів (КА) із метою оптимізації поточних режимів роботи розподільних мереж (РМ), насамперед з інтегрованими локальними відновлюваними джерелами енергії (ЛВДЕ). Підхід, що пропонується, базується на використанні сценарного методу, пов'язаного з аналізом можливих графіків

навантажень та вихідної потужності ЛВДЕ, а, відповідно, режимів роботи контуру РМ, а також процедурою багатокритеріального прийняття рішень, враховуючи їх економічну ефективність, рівень надійності і комутаційний ресурс КА. Підкреслюється важливість реалізації динамічного керування режимами в процесі переходу до побудови гнучкої та ефективної системи розподілу електроенергії. Бібл. 6, рис. 5, табл. 3.

Ключові слова: розподільні мережі, динамічне керування режимами, дистанційно керовані комутаційні апарати, сценарний аналіз, втрати електроенергії, надійність електропостачання.

Abstract. The article addresses issues related to selecting optimal locations for remotely controlled switching devices (SD) to optimize the operating modes of distribution networks (DN), particularly those integrating local renewable energy sources (LRES). The proposed approach is based on a scenario-based method that analyzes possible load schedules and LRES output power, thus determining DN operating modes. Additionally, a multi-criteria decision-making procedure is employed, considering economic efficiency, reliability level, and the switching resource of SDs. The importance of implementing dynamic mode control is emphasized in the transition toward a flexible and efficient power distribution system. Ref. 6, Fig. 5, Tabl. 3.

Keywords: distribution networks, dynamic mode control, remotely controlled switching devices, scenario analysis, power losses, power supply reliability.

Вступ. Динамічне керування режимами розподільної мережі (РМ) є сучасним підходом, спрямованим на підвищення ефективності роботи електричних мереж в умовах широкого використання в їх структурі ЛВДЕ за рахунок зменшення втрат електроенергії шляхом оптимізації розподілу струмів в контурі РМ. Цей процес передбачає використання дистанційно керованих комутаційних апаратів (ДККА) розміщених у певних точках мережі, що дозволяє оперативно змінювати топологію РМ у реальному часі.

Оскільки повна заміна існуючих КА на пристрої з дистанційним керуванням у всіх вузлах РМ є економічно невиправданою через високі фінансові витрати, критично важливим є обґрунтоване визначення місць розміщення ДККА, що дозволить отримати максимальний ефект за рахунок впровадження динамічного керування режимами РМ.

Метою досліджень є розробка методики визначення оптимальних місць встановлення ДККА у РМ з наявними ЛВДЕ для можливості оперативної зміни топології РМ, що надає можливість динамічного керування режимами РМ з метою мінімізації поточних втрат потужності. Вирішення зазначеної задачі передбачається на основі аналізу сценаріїв, що дозволяє врахувати можливі зміни як режимів електроспоживання, так і вихідної потужності інтегрованих в мережу ЛВДЕ.

Матеріал і результати досліджень. Оптимальне розміщення ДККА повинне забезпечити ефективне використання їх комутаційного ресурсу мінімізацію втрат електроенергії, покращення надійності електропостачання. Враховуючи різноманіття умов (у річному та добовому розрізах) у яких мають працювати ДККА, для вирішення зазначеної задачі використовується метод аналізу можливих сценаріїв на підставі використання відповідних ретроспективних даних.

Розглянемо контур РМ, де у якості ЛВДЕ виступають сонячні електростанції (СЕС). У такому випадку сценарії формуються на підставі

аналізу річних змін добових графіків електричного навантаження (ГЕН) та сонячної інсоляції. Для кожного сценарію оптимальне місце розмикання контуру визначається на підставі використання процедури розрахунку режиму контуру з двостороннім живленням [1].

На рис. 1 наведено типові ГЕН для основних типів споживачів (навчальні заклади, заклади харчування, електротранспорт, супермаркети, комунальні господарства, побутові споживачі) [2].

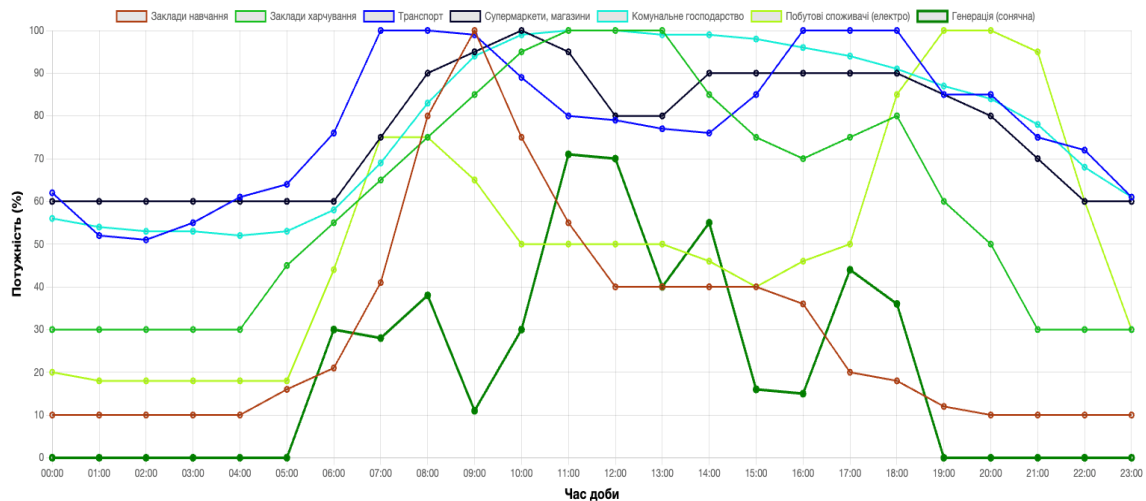


Рисунок 1. Умовний добовий графік навантаження у вузлах розподільної мережі

Наведені ГЕН можуть варіюватися шляхом зміни рівнів завантаження розподільних трансформаторів в залежності від сезону року або ж за рахунок використання відповідних реальних даних.

Додатково, для формування сценаріїв з урахуванням різних періодів року, а також впливу рівнів хмарності на генерацію з боку СЕС у добовому розрізі, використовувалися дані наведені в [3] щодо середньомісячної величини сонячної інсоляції в українських містах за спостереженнями НАСА за останні 22 роки. Це дало змогу сформувати усереднений середньомісячний показник сонячної інсоляції, рис. 2.

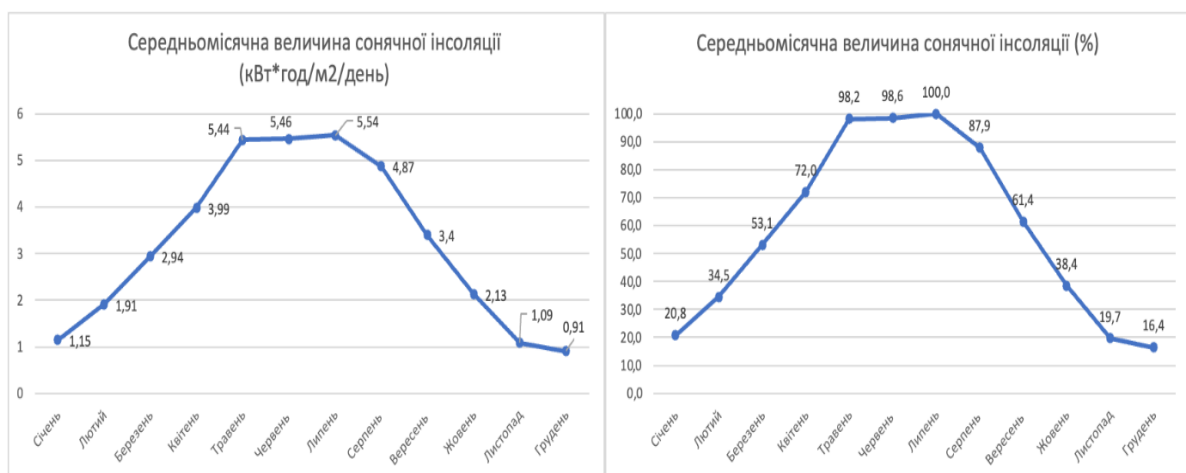


Рисунок 2. Усереднена середньомісячна величина сонячної інсоляції за спостереженнями НАСА за останні 22 роки, кВт*год /м2/ день [3]

Отримані дані було певним чином трансформовано, враховуючи, що в подальших дослідженнях буде використано значення рівнів генерації СЕС у сезонному розрізі, рис. 3.

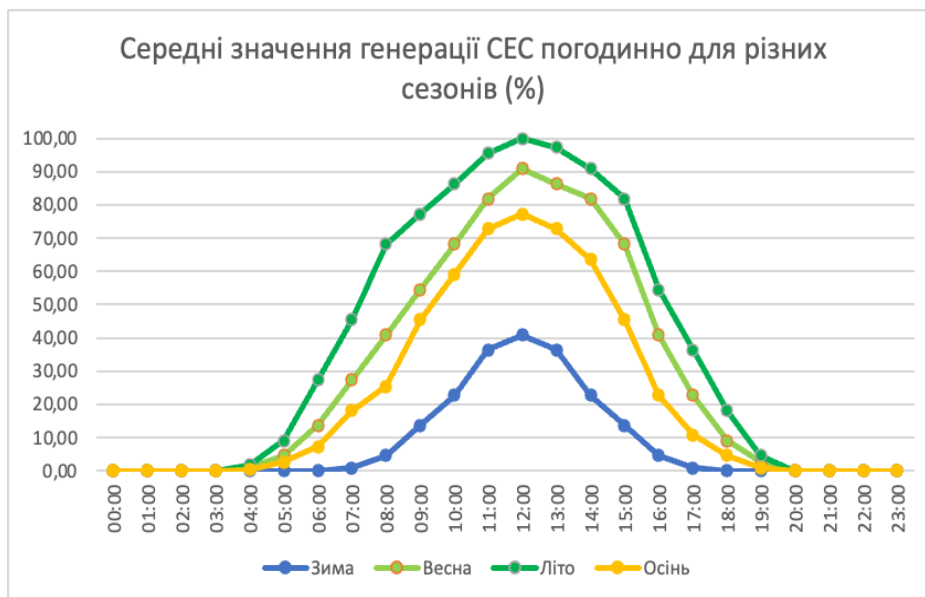


Рисунок 3. Середньодобові погодинні значення генерації СЕС у сезонному розрізі

Метеорологічні умови відіграють важливу роль у функціонуванні СЕС, де серед усіх чинників хмарність виділяється як один із ключових показників. Більш того, хмарність може впливати на сонячну генерацію в добовому погодинному розрізі, тобто рівень генерації СЕС може бути досить нестабільним навіть впродовж доби.

Хмарність — ступінь вкриття неба хмарами оцінюються в балах від 0 (ясно) до 10 (похмуро) відповідно до шкали прийнятої ще на першій Морській міжнародній метеорологічній конференції (Брюссель, 1853 р.). При цьому спочатку визначається хмарність усіх ярусів (загальна), потім окремо для нижнього ярусу (нижня). Кожен бал дорівнює 1/10 або 10 % площі видимого неба, рис. 4.

Знак	Значення	Знак	Значення
	Хмар нема		6 балів
	1 бал		7-8 балів
	2-3 бала		9 і більше балів
	4 бала		10 балів
	5 балів		Суцільна хмарність

Рисунок 4. Шкала хмарності згідно з міжнародними метеорологічними даними [4]

Відповідно до Правил метеорологічного забезпечення польотів державної авіації України для кількості хмарності визначено наступні показники: **хмарно** (7-10 балів), **мінлива хмарність** (4-7 балів), **хмарно з проясненнями** (очікується зміна рівня хмарності від 8-10 балів до 0-3 балів), **малохмарно** (0-3 балів), **переважно малохмарно** (тривалий час очікується 0-3 балів) [5]. На наступних етапах дослідження пропонується класифікувати рівні хмарності згідно умов наведених у табл. 1.

Таблиця 1. Залежність між рівнями хмарності та рівнем сонячної радіації

Рівень хмарності	Глобальна сонячна радіація (Вт/м ²)	Глобальна сонячна радіація (%)	Відносне зменшення генерації (%)
Ясне небо (0-10 %)	800-1000	100 %	0
Малохмарно (10-30 %)	600-800	75-90 %	10-25 %
Середня хмарність (30-70 %)	300-600	40-75 %	25-60 %
Висока хмарність (70-90 %)	100-300	15-40 %	60-85 %
Суцільна хмарність (90-100 %)	10-100	5-15 %	85-95 %

В [1] було продемонстровано, що не залежно від структури реальної мережі (наявність відгалужень, кількість та розташування ЛВДЕ) шляхом еквівалентування будь-яка мережа може бути трансформована до вигляду, наведеному на рис. 5:

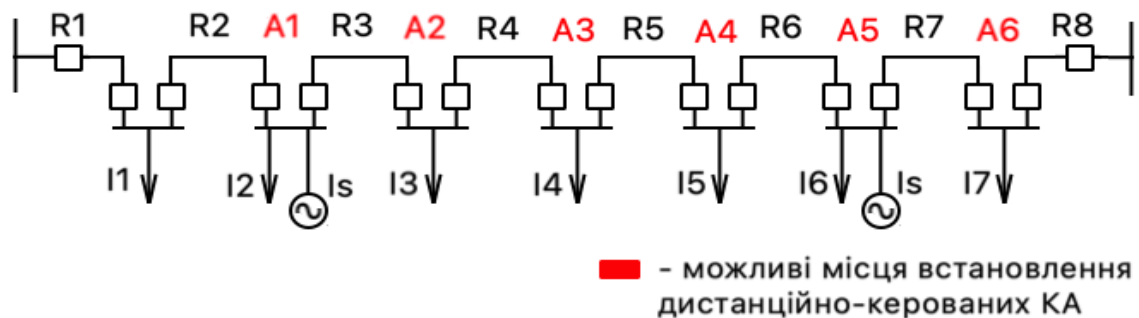


Рисунок 5. Схема розподільної мережі 10 кВ з можливими місцями для встановлення дистанційно-керованих КА

Схема РМ має двостороннє живлення, де виділені можливі місця встановлення ДККА (A1, A2, ..., A6). Головним завданням є перевірка, а також оцінка оптимальності їх місць встановлення на основі певних ретроспективних даних відносно режимів роботи мережі, що були зібрані впродовж попереднього періоду її експлуатації (наприклад, подовж року).

Для проведення дослідження необхідно визначити фактори, на основі аналізу яких можливо зробити необхідні висновки щодо доцільності того чи

іншого рішення щодо розміщення ДККА, враховуючи його вплив на роботи РМ. Такими факторами є:

- S – сезони роботи розподільної мережі (зима, весна, літо, осінь);
- C – характер погодних умов (наприклад рівень хмарності), що безпосередньо впливає на генерацію з ЛВДЕ (табл. 1);
- N_{dsc} – кількість днів коли мали місце зазначені умови (певні показники S та C), при яких зберігався певний (сталій) режим роботи контуру РМ для кожної можливої позиції ДККА;
- потенційно оптимальні місця розмикання контуру РМ і кількість годин протягом доби, коли ці місця розмикання були оптимальними.

Будемо вважати, що розглядаємо 4 сезони року і 5 рівнів хмарності. Також припустимо, що в процесі аналізу створених сценаріїв було визначено 6 можливих оптимальних місць розмикання контуру з різною тривалістю використання кожного з них (табл. 2).

Для кожного варіанту (який визначається графіками навантаження, що відповідають певному характерному сезону року і графіками генерації з боку ЛВДЕ, які відповідають окремим рівням хмарності неба, отриманим на підставі розгляду загальнодоступних ретроспективних даних) визначаються оптимальні точки розмикання контуру по окремим періодам часу. Можливо припустити що впродовж доби оптимальні місця розмикання будуть змінюватися. Тоді необхідно визначити тривалість часу впродовж якого ті чи інші точки розмикання були оптимальними.

На основі змодельованих таким чином режимів було сформовано інтегральний показник, який характеризує ефективність використання того чи іншого місця локалізації ДККА для різних умов у розрізі річного використання (днів/рік), а також з урахуванням середньодобового використання (год/добу), табл. 2.

Таблиця 2. Сценарії використання ДККА

Оцінка можливих місць розташування дистанційно-керованих КА на основі аналітичних даних																				
Сезон – S	Зима					Весна					Літо					Осінь				
Рівень хмарності – C	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Кількість днів – N_{dsc}	17	14	19	23	17	16	17	20	13	27	27	18	13	20	15	14	18	22	17	18
Оптимальне місце розмикання КА1	A1	A1	A2	A2	A2	A1	A2	A2	A2	A3	A1	A1	A2	A2	A3	A1	A2	A2	A2	A3
T – середньодобова тривалість (год/добу)	12	10	9	11	10	12	6	12	14	14	12	12	12	12	13	12	6	12	12	14
Оптимальне місце розмикання КА2	A3	A3	A4	A4	A4	A3	A3	A4	A4	A5	A4	A4	A4	A5	A5	A3	A3	A4	A4	A5
T – середньодобова тривалість (год/добу)	6	8	7	5	10	6	12	6	4	10	8	6	4	10	11	6	12	6	4	10
Оптимальне місце розмикання КА3	A6	A6	A6	A5	A5	A5	A5	A6	A6	A6	A5	A5	A5	A6	A6	A5	A5	A6	A6	A6
T – середньодобова тривалість (год/добу)	6	6	8	8	4	6	6	6	6	0	4	6	8	2	0	6	6	6	8	0

Надалі визначаємо відносно по тривалості положення кожного оптимального місця розмикання контуру протягом року з урахуванням усіх сценаріїв, що розглядаються:

$$A_n = T \cdot Nd_{SC}; \quad (1)$$

$$A'_n = \frac{A_n}{8760}. \quad (2)$$

Результати розрахунків наведено у табл. 3.

Таблиця 3. Показники відносного по тривалості положення кожного оптимального місця розмикання контуру РМ упродовж року

№ ДККА	Середня тривалість застосування (год/добу)	год/рік	A' (%)
A1	12	1244	14 %
A2	11	2090	24 %
A3	10	1639	19 %
A4	6	1166	13 %
A5	7	1777	20 %
A6	4	844	10 %

Логічно припустити, що перевага має віддаватися місцям розміщення ДККА, які мають найбільшу відносну тривалість використання (год/рік). За результатами, що наведено в табл. 2, оптимальними місцями встановлення ДККА з точки зору відносної тривалості використання є позиції A2 та A5.

З іншого боку зрозуміло, що оскільки певні оптимальні місця розмикання конура мережі мають місце на різних часових інтервалах впродовж доби з різними навантаженнями мережі, то і ефект с позиції зменшення втрат електричної енергії також буде різним.

Наприклад, ділянка $j = 5$ була визначена найкращим місцем розмикання контуру у сценарії $s = 1$, $c = 1$ – на часових інтервалах $t1, \dots, t5$; $t12, \dots, t15$, в сценарії $s = 1$, $c = 2$ – на часовому інтервалі $t17, \dots, t24$;... ; в сценарії $s = 4$, $c = 5$ – на часових інтервалах $t6, \dots, t11$; $t17, \dots, t18$; $t22, \dots, t24$.

Урахування факту, що при цьому на окремих інтервалах часу має місце різні навантаження, а, відповідно і різні втрати потужності, здійснюється шляхом включення в розрахунки середніх (на кожному з часових інтервалів) значень навантажень ($P_{s,c,j}$) або значення електроспоживання ($A_{s,c,j}$).

Розглянувши таким чином всі сценарії ($s = 1, \dots, S$; $c = 1, \dots, C$) з урахуванням зазначених характеристик навантаження на відповідних часових інтервалів для кожної точки розмикання (j), що розглядаються, визначаємо інтегральний показник (V_j), який буде демонструвати умовну очікувану ефективність кожного рішення наступним чином:

$$V_j = \sum_{i=1}^n P_{s,c,j} \cdot A_{s,c,j}^2 \quad (3)$$

Найкращим рішенням буде варіант, де показник V_j приймає максимальне значення.

Висновки. Питання вибору оптимальних місць встановлення дистанційно керованих комутаційних апаратів є одним з ключових факторів на шляху до реалізації динамічного керування режимами розподільних мереж в умовах широкого впровадження ЛВДЕ, що є ефективним рішенням, яке забезпечує радикальне зменшення втрат електричної енергії при раціональному використанні комутаційного ресурсу вимикачів.

Список використаних джерел

1. Попов В., Ткаченко В., Ярмолюк О., Яценко Д. Актуальні тенденції автоматизації систем розподілу електроенергії // Kyrylenko O., Denysiuk S., Derevianko D., Blinov I., Zaitsev I., Zaporozhets A. (ред.). *Power Systems Research and Operation. Studies in Systems, Decision and Control*, vol 220. Springer, Cham, С. 319–346. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-17554-1_14 (дата звернення 03.02.2025).
2. Папайка Ю. А. та ін. Методологія вибору номінальних параметрів силових трансформаторів у розподільних електричних мережах населених пунктів // Електротехніка і електроенергетика, 2021, № 2, С. 33–43. URL: <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2021-2-4> (дата звернення 03.02.2025).
3. Інсоляція: вплив на виробництво електроенергії сонячними панелями | Solar Garden. Solar Garden. URL: <https://www.solargarden.com.ua/insolyatsiya-vplyv-na-vyrobnytstvo-elektroenergiyi-sonyachnymy-panelyamy/> (дата звернення 06.02.2025).
4. Chrobak P., Skovajsa J., Zalesak M. Вплив хмарності на виробництво електроенергії фотоелектричними панелями // MATEC Web of Conferences, 2016, Т. 76, С. 02010. URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/20167602010> (дата звернення 16.02.2025).
5. Савельєв О. Г. Атлас хмар: навчальний посібник. Запоріжжя, 2015. 20 с. URL: https://web.archive.org/web/20181221121812/http://shron1.chtyvo.org.ua/Saveliev_Oleksandr/Atlas_khmar.pdf (дата звернення 10.02.2025).
6. Про затвердження Правил метеорологічного забезпечення польотів державної авіації України. Офіційний вебпортал парламенту України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/z126415?utm_source=chatgpt.com#Text (дата звернення 11.02.2025).

References

1. Popov V., Tkachenko V., Yarmolyuk O., Yatsenko D. *Actual Trends of Electrical Distribution Systems Automation* // Kyrylenko O., Denysiuk S., Derevianko D., Blinov I., Zaitsev I., Zaporozhets A. (eds). *Power Systems Research and Operation. Studies in Systems, Decision and Control*, vol. 220. Springer, Cham, pp. 319–346. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-17554-1_14 (accessed 03.02.2025). (Ukr).
2. Papaika Y. A. et al. *Methodology for selecting the rated parameters of power transformers in the town's electrical distribution networks in settlements. Electrical Engineering and Power Engineering*, 2021, No. 2, pp. 33–43. URL: <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2021-2-4> (accessed 03.02.2025). (Ukr).
3. Insolation: The impact on electricity generation by solar panels | Solar Garden. Solar Garden. URL: <https://www.solargarden.com.ua/insolyatsiya-vplyv-na-vyrobnytstvo-elektroenergiyi-sonyachnymy-panelyamy/> (accessed 06.02.2025). (Ukr).
4. Chrobak P., Skovajsa J., Zalesak M. *Effect of cloudiness on the production of electricity by photovoltaic panels. MATEC Web of Conferences*, 2016, vol. 76, p. 02010. URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/20167602010> (accessed 16.02.2025). (Ukr).

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 ПОЛІПШЕННЯ 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*