

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
„КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”

Наукова конференція

Аспірантські читання імені професора Артура Веніаміновича Праховника

до 85-річчя від дня народження

25–26 БЕРЕЗНЯ 2025 РОКУ

Матеріали конференції

Рекомендовано Вченою Радою КПІ ім. Ігоря Сікорського

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2025

УДК 621.31 + 622.271
М34

*Рекомендовано до друку та поширення Інтернет рішенням Вченої Ради
Національного технічного університету України
„Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”
(протокол № 7 від 30.06.2025 р.)*

*за поданням вченої ради навчально-наукового інституту енергозбереження
та енергоменеджменту
(протокол № 9 від 30.04.2025 р.)*

М34 Матеріали наукової конференції „Аспірантські читання імені професора Артура Веніаміновича Праховника”, до 85-річчя від дня народження (25–26 берез. 2025 р.) / кол. авт. за заг. ред. О. В. Коцара ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во „Політехніка”, 2025. – 226 с.

ISBN 978-966-990-156-9

Матеріали містять тези наукових доповідей студентів аспірантури і магістратури навчально-наукового інституту енергозбереження та енергоменеджменту і факультету електроенерготехніки та автоматики КПІ ім. Ігоря Сікорського та інших вищих навчальних закладів України за спеціальностями 141 „Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка” і 184 „Гірництво” на всеукраїнській науковій конференції „Аспірантські читання імені професора Артура Веніаміновича Праховника”, до 85-річчя від дня народження, яка відбулася у КПІ ім. Ігоря Сікорського 25–26 березня 2025 року.

УДК 621.31 + 622.271

*Матеріали подано в авторській редакції.
За достовірність фактів, цитат, власних імен та інших даних
відповідають автори публікацій*

ISBN 978-966-990-156-9

© Автори публікацій, 2025
© КПІ ім. Ігоря Сікорського (НН ІЕЕ), 2025



Кажуть, що професія викладача – це для обраних. Бо це не просто передача інформації – це процес формування майбутніх особистостей, допомога в їх розвитку та самореалізації.

Кажуть, що науковець – це людина високих організаційних здібностей, самовіддана, дипломатична, щира, жертвна, яка щиро вірить у свою справу. Це покликання, що вимагає цілеспрямованості і постійного самовдосконалення. І коли ці всі риси поєднуються в одній людині, ми отримуємо справжнього Учителя. Людину, яка не просто ділиться знаннями, а й надихає на нові досягнення, формує майбутнє своїх учнів і колег. Таким яскравим прикладом для нас є **Артур Веніамінович Праховник**, доктор технічних наук, професор, видатний науковець-енергетик, провідний фахівець у галузі управління енерговикористання, енергозбереження та енергетичного менеджменту, заслужений викладач і організатор вищої освіти. Усе його професійне життя міцно пов'язане з Національним технічним університетом України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”.

Роки минають, а спогади залишаються з нами назавжди. Лауреат Нобелівської премії Моріс Метерлінк писав, що люди, які відійшли у вічність, живуть у країні спогадів і залишаються живими доти, поки ми згадуємо про них. От і сьогодні, з нагоди 85 річчя з дня народження Артура Веніаміновича Праховника ми згадуємо Людину, яка стала для нас символом великої праці та відданості своїй справі.

Народився Артур Веніамінович 21 грудня 1940 року в республіці Білорусь на Гомельщині у сім'ї зв'язківців. Після закінчення Нововолинської гірничопромислової школи з 1958 по 1962 роки працював в шахтах № 6 та № 7 треста “Нововолинськвугілля” машиністом-мотористом підземних установок. За сумлінне ставлення до роботи керівництвом шахти було ухвалено рішення направити його для подальшого навчання. Так в 1961 році Артур Праховник поступив до Київського політехнічного інституту (КПІ). Роки навчання промайнули, мов одна мить. Вони були щасливі, насичені, цікаві.

Після закінчення факультету автоматики та електроприладобудування КПІ в 1965 році Артур Веніамінович Праховник був запрошений на кафедру автоматизації гірничої промисловості, де розпочав свою науково-педагогічну діяльність під керівництвом його незмінного наставника і улюбленого вчителя професора Василя Миколайовича Винославського. В 1971 році захистив кандидатську дисертацію, в якій вперше було запропоновано широке застосування технічного потенціалу промислових підприємств для керування навантаженням в електроенергетичних системах. І з 1974 року працював на посаді доцента. У 1976 – 1977 роках стажувався у Делфтському технологічному університеті (Нідерланди). З невичерпною жагою до знань і вірою в свої ідеї невтомний пошук істини та наполеглива праця дали свої результати і у 1982 році Артур Веніамінович захистив докторську дисертацію, де вперше було визначено доцільність комплексного дослідження режимів електроспоживання, розроблено автоматизовану

систему обліку та управління електроспоживанням. Ця система відрізнялась від вже відомих як елементною базою, так і додатковими функціями, наприклад, мала функцію прогнозування та управління навантаженням в реальному часі.

Артур Веніамінович Праховник вдало поєднував активну організаційно–адміністративну діяльність з інтенсивною науковою та навчально-методичною роботою. Так, у 1984 – 1989 роках Артур Веніамінович обіймав посаду проректора КПП з навчальної роботи і одночасно був професором кафедри електропостачання КПП та науковим керівником галузевої науково–дослідницької лабораторії “Методи і засоби контролю та управління електроспоживанням” (спільний наказ Міненерго та Міносвіти УРСР № 229/466 від 21.12.1983).

У цей період його праця була багатогранною й головне результативною та послідовною. У 1985 році – заснував та очолив кафедру автоматизації управління електроспоживанням, яку згодом було об’єднано з кафедрою електропостачання (1988 р.). А у 1987 році разом з однокумцями заснував інженерний центр енергозбереження КПП, і в 1991 році – науково дослідний інститут автоматики та енергетики “Енергія”.

Багаж знань, досвід, надійний і кваліфікований колектив наштовхнули на думку ініціювати створення учбово-навчального Інституту енергозбереження та енергоменеджменту (ІЕЕ) НТУУ “КПІ” на базі факультету гірничої електромеханіки та автоматики і, частково, факультету електроенерготехніки та автоматики. Так у 1997 року Артур Веніамінович Праховник став керівником створеного інституту за підтримки і постанови Кабінету Міністрів України учбово-навчального Інститут енергозбереження та енергоменеджменту (ІЕЕ) НТУУ “КПІ”.

Результатом цієї роботи стало створення в системі вищої освіти України та відкриття нової спеціальності “Енергетичний менеджмент”.

В тому ж році за сприяння Європейської співдружності під керівництвом та за безпосередньої участі Артура Веніаміновича було відкрито мережу навчальних Центрів з підготовки енергоменеджерів (ЦПЕМ), провідний з яких і сьогодні діє в КПП ім. Ігоря Сікорського. Основні напрями діяльності Центру є підготовка кадрів, професійна перепідготовка та підвищення кваліфікації фахівців у сфері енергозбереження та енергетичного менеджменту.

В останні роки свого життя Артур Веніамінович створив при ІЕЕ НТУУ “КПІ” науково-дослідницький центр енергетики сталого розвитку, а також був одним із засновників національної наукової школи з управління енерговикористанням.

Він відомий своїми фундаментальними працями з питань моделювання в енергетиці, автоматизації управління енергетичними об’єктами, прогнозування, оптимізації режимів електроспоживання, енергетичного менеджменту, сталого розвитку енергетики, зокрема, з формування принципів побудови електричних станцій на базі розосереджених джерел

генерації та Smart-мікроенергетичних систем, охоплюючи відновлювані джерела енергії, та екоенергоефективних Smart-будинків та Smart-міст.

Кар'єра стрімко розвивається, його особисті якості як викладача, наставника та наукового керівника забезпечили високий та незаперечний авторитет, завдяки цьому було підготовлено цілу плеяду українських науковців і викладачів. Під його керівництвом розроблено та захищено 21 кандидатську дисертацію. Він був науковим консультантом 5 докторських дисертацій. Його учні не лише перейняли досвід, а й самі стали гідними послідовниками його наукових поглядів, розширюючи горизонти сучасної науки.

Науково–дослідницька діяльність Артура Веніаміновича Праховника знайшла своє втілення у майже 400 наукових працях, виданих в багатьох країнах світу, зокрема, в Болгарії, Польщі, Бразилії, Італії, Нідерландах, Німеччині, США, Великій Британії та ін. Досвід викладацької роботи забезпечив можливість втілення в життя таких здобутків: 31 книга (11 монографій, 12 навчальних посібників та 8 посібників для спеціалістів промисловості), 40 винаходів та 13 державних стандартів.

За результатами наукових розробок під керівництвом Артура Веніаміновича Праховника було організовано серійний випуск комплексів технічних засобів контрольно-вимірювальної та управляючої системи ЦТ5000 на заводі “Точелектроприлад”, які було впроваджено на численних електроенергетичних та промислових підприємствах СРСР, Болгарії та Польщі. Впровадження було відзначено медалями та дипломами ВДНГ СРСР (“Бронзова медаль” – 1978, “Срібна медаль” – 1984, 1987, 1988 і 1990, “Диплом першого ступеню” – 1989), ВДНГ УРСР (“Диплом другого ступеню” – 1982 та “Диплом першого ступеню” – 1983).

Артур Веніамінович активно розвивав важливу складову наукового життя, міжнародні наукові зв'язки, займався пошуком нових форм міжнародного співробітництва, постійно виступав з лекціями та науковими доповідями в навчальних та наукових центрах США, Італії, Китаю, Великої Британії та інших країн. Був дійсним членом Нью-Йоркської Академії Наук, IEEE, IREP, членом Ради Інституту Леонардо да Вінчі (Німеччина), віцепрезидентом “Association European Union” (Німеччина), почесним членом наглядової Ради Міжнародного біографічного центру (Велика Британія).

Одним із напрямів діяльності Артура Веніаміновича була активна громадська робота. В різні часи він був головою учбово-методичної комісії Міністерства освіти УРСР, головою спеціалізованої Ради із захисту дисертацій, заступником голови Київського обласного правління НТОЕ і ЕП, членом експертної комісії Міносвіти України з розгляду матеріалів про нагородження викладачів вузів, членом експертної Ради Держкомітету СРСР з народної освіти з проблем енергетики, експертом ЮНЕСКО з освіти. Також, головою науково-експертної ради та профільної ради з електротехніки та електромеханіки Міністерства освіти та науки України, науково-технічних рад Мінтопенерго та Держкоменергозбереження України, Центрального правління електротехніків України, головою ради Учбово-

навчального комплексу “Енергетика” НТУУ “КПІ”, консультантом Комітету Верховної Ради України з питань паливно–енергетичного комплексу, ядерної політики та ядерної безпеки.

Мрії про розвиток рідної Альма-матер здійснились, а разом з цим прийшло визнання. За його потужний доробок у науковій, педагогічній, державотворчій, громадській діяльності Артуру Веніаміновичу були присвоєні почесні звання “Заслуженого діяча науки і техніки України”, “Заслуженого енергетика країн СНД”, Почесного енергетика України, “Заслуженого професора НТУУ “КПІ”, “Ветерана праці”. Його було відзначено медаллю “Президиума Верховного Совета ССРСР”, державним орденом України “За заслуги” III ступеня (2008), знаком “Відмінник освіти України” (2000), нагрудним знаком “Почесний енергетик України” (2003), відзнакою Державного комітету України з енергозбереження “Знак пошани” (2006), знаком МОН України “За наукові досягнення” (2006), нагрудним знаком з нагоди 130-річчя НТСЄЕУ (Науково-технічна спілка енергетиків та електротехніків України), як почесний член НТСЄЕУ (2010). У 2014 році став лауреатом Державної премії України в галузі науки і техніки.

Наукові здобутки і дослідницька діяльність Артура Веніаміновича Праховника оцінені науковцями всього світу і його ім’я занесено до видання Золотий фонд нації “Золоте сузір’я України”, “Who’s Who in the World” (“Хто є Хто в Світі”), “Who’s Who in Science and Engineering” (“Хто є Хто в науці та інженерії”) США, та в книгу Міжнародного біографічного центру (Кембридж, Англія), “Outstanding People of the 20-th Century” (“Відомі люди 20 століття”). Американський біографічний інститут обрав його Людиною 2000 року і нагородив пам’ятною медаллю та статуеткою Universal of Accomplishment (Визнаний), а Американський біографічний інститут обрав його “Людиною 2008 року” від України.

Важко переоцінити внесок Артура Веніаміновича Праховника до світової науки і освіти, і для нас спадкоємців. Йому завжди були притаманні високий професіоналізм, фаховість, комплексність наукових підходів, наполегливість, цілеспрямованість, безкомпромісність, що здобули йому високий авторитет і пошану серед однодумців та опонентів. Щирість, доброзичливість, відвертість зробили його найулюбленішим наставником та другом. Світла пам’ять про Артура Веніаміновича Праховника завжди житиме в серцях всіх, хто навчався, працював та спілкувався з ним.



UB
КПІ ім. Ігоря Сікорського
№НОД/122/25 від 14.02.2025
КЕП: Мельниченко А. А. 14.02.2025 16:29
3FAA9288358EC0030400000013073000873BD900



УКРАЇНА

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”

НАКАЗ № НОД/122/25

м. Київ

«14» лютого 2025 р.

**Про проведення Всеукраїнської наукової конференції
«Аспірантські читання імені професора Артура Веніаміновича Праховника»,
до 85-річчя з дня народження**

З метою вшанування пам'яті і популяризації наукової школи професора Артура Веніаміновича Праховника, підтримки спілкування досвідчених і молодих науковців та розвитку міжуніверситетського наукового співробітництва

НАКАЗУЮ:

1. Провести Всеукраїнську наукову конференцію «Аспірантські читання імені професора Артура Веніаміновича Праховника», до 85-річчя з дня народження (далі – Конференція) в період з 25 по 26 березня 2025 року на базі Навчально-наукового інституту енергозбереження та енергоменеджменту КПІ ім. Ігоря Сікорського у дистанційному режимі.
2. Затвердити склад програмного комітету Конференції (додаток 1).
3. Створити організаційний комітет Конференції (додаток 2), доручивши йому вирішення всіх питань, пов'язаних із підготовкою та проведенням Конференції.
4. Затвердити програму з підготовки та проведення Конференції (додаток 3). Можливість видання матеріалів конференції, які плануються до опублікування, оформити актом експертизи в порядку, що установлений в КПІ ім. Ігоря Сікорського.
5. Оргкомітету конференції відпрацювати перехід Конференції на організаційну платформу Open Conference Systems (OCS) та оприлюднити матеріали Конференції в доменній зоні kpi.ua.
6. В роботі щодо організації змістовної частини Конференції (проголошення доповідей, публікація тез та матеріалів, ін.) – оргкомітету керуватися положеннями наказу від 29.12.2020 №НОН/61/2020.
7. Головному бухгалтеру К.М. Заїць взяти до уваги, що витрати на проведення Конференції за рахунок коштів КПІ ім. Ігоря Сікорського не передбачено.
8. Контроль за виконанням наказу покласти на проректора з наукової роботи С.Г. Стіренка.

Ректор

Анатолій МЕЛЬНИЧЕНКО



UB
КПІ ім. Ігоря Сікорського
№НОД/122/25 від 14.02.2025
КЕП: Мельниченко А. А. 14.02.2025 16:29
3FAA9288358EC0030400000013073000873BD900

ОРГАНІЗАТОРИ:

Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”
Навчально-науковий інститут енергозбереження та енергоменеджменту

ОРГКОМІТЕТ КОНФЕРЕНЦІЇ:

Коцар Олег Вікторович, канд. техн. наук, доцент кафедри електропостачання, голова оргкомітету

Босак Алла Василівна, канд. техн. наук, доцентка кафедри автоматизації електротехнічних та мехатронних комплексів, заст. директора НН ІЄЕ з наукової роботи

Вапнічна Вікторія Вікторівна, канд. техн. наук, доцентка кафедри геоінженерії

Жолтайли Софія Юріївна, PhD, старша викладачка кафедри автоматизації електротехнічних та мехатронних комплексів

Праховнік Наталія Артурівна, канд. техн. наук, доцентка кафедри охорони праці, промислової та цивільної безпеки

Сергієнко Микола Іванович, старший викладач кафедри геоінженерії

Чумак Вадим Володимирович, канд. техн. наук, професор, зав. кафедри електромеханіки

Наукові напрями конференції:

- Сталий розвиток енергетики
- Сучасні системи забезпечення споживачів електричною енергією
- Енергетичний менеджмент та енергоефективні технології
- Ринки електричної енергії
- Управління попитом та забезпечення гнучкості попиту
- Мікромережі та активні системи розподілу електричної енергії
- Відновлювані джерела енергії
- Сучасні системи накопичення/зберігання електричної енергії
- Електричні мережі та системи
- Електричні машини та апарати
- Інжиніринг та автоматизація електротехнічних комплексів
- Мехатроніка енергоємних виробництв
- Проблеми видобутку корисних копалин
- Геотехнічне і міське підземне будівництво
- Інженерна екологія та ресурсозбереження
- Проблеми охорони праці, промислової та цивільної безпеки

ПРОГРАМНИЙ КОМІТЕТ:

**Мельниченко
Анатолій
Анатолійович**

канд. філос. наук, професор, ректор КПІ ім. Ігоря Сікорського, Голова програмного комітету

**Вовк Оксана
Олексіївна**

д-р техн. наук, професорка, директорка НН ІЕЕ, заст. Голови програмного комітету

**Басок Борис
Іванович**

д-р техн. наук, професор, професор кафедри електропостачання

**Бориченко Олена
Володимирівна**

канд. техн. наук, доцентка, завідувачка кафедри електропостачання

**Будько Василь
Іванович**

д-р техн. наук, професор кафедри відновлюваних джерел енергії, декан факультету електроенерготехніки та автоматики

**Бойченко Сергій
Валерійович**

д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри автоматизації електротехнічних та мехатронних комплексів

**Буткевич
Олександр
Федотович**

д-р техн. наук, професор кафедри електричних мереж і систем

**Веремійчук Юрій
Андрійович**

канд. техн. наук, доцент кафедри електропостачання, голова профкому КПІ ім. Ігоря Сікорського

**Волошко Анатолій
Васильович**

д-р техн. наук, професор кафедри електропостачання

**Данілін Олександр
Валерійович**

канд. техн. наук, доцент кафедри автоматизації електротехнічних та мехатронних комплексів

**Дерев'янка Денис
Григорович**

канд. техн. наук, доцент кафедри електропостачання

**Зайченко Стефан
Володимирович**

д-р техн. наук, професор кафедри автоматизації електротехнічних та мехатронних комплексів

**Закладний Олег
Олександрович**

канд. техн. наук, доцент кафедри електропостачання

Замулко Анатолій Ігорович	канд. техн. наук, доцент кафедри електропостачання, т.в.о. Голови Держенергонагляду України
Зуєвська Наталя Валеріївна	д-р техн. наук, професорка, завідувачка кафедри геоінженерії
Іншеков Євген Миколайович	канд. техн. наук, доцент, експерт UNIDO з енергетичного менеджменту та стандартизації за ISO 50001
Калінчик Василь Прокопович	канд. техн. наук, доцент кафедри електропостачання
Качан Юрій Григорович	д-р техн. наук, професор кафедри електропостачання промислових підприємств Національний університет “Запорізька політехніка”
Крючков Анатолій Іванович	канд. техн. наук, доцент кафедри геоінженерії
Левченко Олег Григорович	д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри охорони праці, промислової та цивільної безпеки
Лежнюк Петро Дем'янович	д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри електричних станцій і систем Вінницького національного технічного університету
Лазуренко Олександр Павлович	канд.техн. наук, професор, завідувач кафедри електричних станцій Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”
Мазуренко Леонід Іванович	д-р техн. наук, професор кафедри автоматизації електротехнічних та мехатронних комплексів
Находов Володимир Федорович	д-р техн. наук, доцент кафедри електропостачання
Півняк Геннадій Григорович	академік НАН України, д-р техн. наук, професор, почесний ректор Національного технічного університету “Дніпровська політехніка”
Попов Володимир Андрійович	д-р техн. наук, професор кафедри електропостачання
Прокопенко Володимир Васильович	канд. техн. наук, доцент кафедри електропостачання

Ремез Наталя Сергіївна	д-р техн. наук, професорка кафедри геоінженерії
Розен Віктор Петрович	д-р техн. наук, професор, науковий керівник кафедри автоматизації електротехнічних та мехатронних комплексів
Сліденко Віктор Михайлович	д-р техн. наук, професор кафедри автоматизації електротехнічних та мехатронних комплексів
Тверда Оксана Ярославівна	д-р техн. наук, професорка кафедри геоінженерії, заст. директора НН ІЕЕ
Ткачук Костянтин Костянтинович	д-р техн. наук, професор кафедри геоінженерії
Третьякова Лариса Дмитрівна	д-р техн. наук, професорка кафедри охорони праці, промислової та цивільної безпеки
Фролов Олександр Олександрович	д-р техн. наук, професор кафедри геоінженерії
Чернецька Юлія Валентинівна	канд. техн. наук, доцентка кафедри електропостачання
Чернявський Анатолій Володимирович	канд. техн. наук, доцент кафедри електропостачання, директор Центру підготовки енергоменеджерів
Шайдецька Любов Валентинівна	канд. техн. наук, доцентка кафедри геоінженерії, заст. директора НН ІЕЕ
Шевчук Степан Прокопович	д-р техн. наук, професор кафедри автоматизації електротехнічних та мехатронних комплексів
Юрченко Олег Миколайович	д-р техн. наук, професор кафедри автоматизації електротехнічних та мехатронних комплексів
Ярмолюк Олена Сергіївна	канд. техн. наук, доцентка кафедри електропостачання

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА.....	18
Віталій СТЕПАНЕНКО Особливості врахування коефіцієнта ефективності інтеграції відновлюваних джерел енергії при формуванні тарифу на послуги з розподілу електричної енергії / В. А. Степаненко, аспірант, наук. керівник: канд. техн. наук, доцент А. І. Замулко, КПІ ім. Ігоря Сікорського.....	20
Денис ЛУГІН Аналіз комутаційних перехідних режимів в дальній електропередачі напругою 400 кВ / Д. М. Лугін, магістрант, наук. керівник: канд. техн. наук, доцент Т. Л. Кацадзе, КПІ ім. Ігоря Сікорського.....	26
Владислав КІЯНЧУК Використання водонагрівачів для реагування на попит в енергосистемі / В. М. Кіянчук, аспірант, наук. керівник: канд. техн. наук, с. н. с. К. В. Махотіло, Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”.....	33
Ярослав НІЦАК Аналіз та моделювання енергоспоживання гвинтових компресорних установок на основі положення золотника / Я. М. Ніцак, аспірант, наук. керівник: канд. техн. наук, доцентка А. В. Босак, КПІ ім. Ігоря Сікорського.....	39
Владислав НАТАЛИЧ Обґрунтування місць розміщення дистанційно керованих комутаційних апаратів в умовах динамічного керування режимами розподільних мереж / В. О. Наталич, аспірант, наук. керівники: д-р техн. наук, професор В. А. Попов, канд. техн. наук, доцентка О. С. Ярмолюк, КПІ ім. Ігоря Сікорського.....	43
Юрій ВЕРБОВИЙ 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 / Ю. В. Вербовий, аспірант, наук. керівник: д-р техн. наук, доцент С. М. Ковбаса, КПІ ім. Ігоря Сікорського....	51
Юрій ШЕРСТНЬОВ Адаптивне керування компенсаторами реактивної потужності підприємств гірничозбагачувального комбінату / Ю. В. Шерстньов, аспірант, наук. керівник: канд. техн. наук, доцент Ю. Г. Осадчук, Криворізький національний університет.....	58
Святослав ДОВГИЙ Підвищення достовірності енергомоніторингу МСП через бенчмаркінг / С. С. Довгий, аспірант, наук. керівник: канд. техн. наук, доцент О. В. Коцар, КПІ ім. Ігоря Сікорського.....	63

Олег БАЗАРОВ Порівняння двигуна з аксіальним магнітним потоком та двигуна циліндричної конструкції з постійними магнітами / О. О. Базаров, аспірант, наук. керівник: канд. техн. наук, доцент М. А. Коваленко, КПІ ім. Ігоря Сікорського.....	71
Олександр КОПЧИКОВ Оптимізаційне моделювання закупівель електроенергії непобутовим споживачем в умовах обмежень та невизначеності ринкових цін / О. М. Копчиков, аспірант, наук. керівник: канд. техн. наук, доцент В. П. Калінчик, КПІ ім. Ігоря Сікорського.....	75
Ярослав ПРИЩЕПА Оцінка ризиків індикативного показника безпеки постачання електричної енергії / Я. О. Прищепа, аспірант, наук. керівник: канд. техн. наук, доцент А. І. Замулко, КПІ ім. Ігоря Сікорського.....	83
Артем КАРПЕНКО Визначення пріоритетних секторів енергетичного планування в муніципалітетах / А. В. Карпенко, аспірант, наук. керівник: канд. техн. наук, доцент О. В. Коцар, КПІ ім. Ігоря Сікорського.....	87
Анна БУРЯК Алгоритми кластеризації та їх значення в управлінні електричними мережами / А. Р. Буряк, аспірантка, наук. керівник: д-р техн. наук, професор В. В. Кирик, КПІ ім. Ігоря Сікорського.....	96
Іван КАВУН Оцінювання рівня цифровізації енергетичних об'єктів / І. М. Кавун, аспірант, наук. керівник: канд. техн. наук, доцент А. І. Замулко, КПІ ім. Ігоря Сікорського.....	103
Микола ЛУНІН Побудова системи енергетичного моніторингу будівель бюджетної сфери / М. М. Лунін, аспірант, наук. керівник: д-р техн. наук, доцент В. Ф. Находов, КПІ ім. Ігоря Сікорського.....	106
Vitalii KARNAUKH Analysis of electric power quality issues in the power grid with distributed generation / Vitalii Karnaukh, PhD student, scientific supervisor: Cand. Sc. (PhD), Associate Professor Anatolii Marchenko, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute.....	111
Ігор БОГОЙКО Оптимізація енергоменеджменту зарядних станцій електромобілів у розосереджених енергосистемах / І. І. Богойко, аспірант, наук. керівник: д-р техн. наук, професор С. П. Денисюк, КПІ ім. Ігоря Сікорського.....	115
Дмитро ЩЕРБИНА Механічні накопичувачі енергії: аналіз технологій та застосування в енергосистемах / Д. В. Щербина, магістрант, наук. керівник: канд. техн. наук, доцент Т. Л. Кацадзе, КПІ ім. Ігоря Сікорського...../.....	122

Денис ЖУКОВ Інтеграція відновлюваних джерел та накопичувачів енергії в Україні: технічні, економічні та регуляторні аспекти / Д. Ю. Жуков, аспірант, наук. керівник: канд. техн. наук, доцентка О. В. Бориченко, Національний університет харчових технологій.....	130
Andrii TRACHUK Recommended methodological approaches to the organization and implementation of an energy-saving concept in the context of increasing the volume of renewable energy generation capacity in Ukraine / Andrii Trachuk, PhD student, scientific supervisor: Dr. Sc. (Eng.), Professor Stephan Zaichenko, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute	135
Сергій ЖИТНИЦЬКИЙ Огляд підходів до визначення топології живильних та розподільчих електричних мереж / С. О. Житницький, аспірант, наук. керівник: канд. техн. наук, доцент Д. В. Федоша, Національний університет “Запорізька політехніка”.....	142
Владислав ЦЮХ Аналіз нормативно-правового регулювання розвитку розподіленої генерації в Україні / В. О. Цюх, аспірант, наук. керівник: канд. техн. наук, доцент Ю. А. Веремійчук, КПІ ім. Ігоря Сікорського.....	147
Андрій ГОЄНКО Розробка концепції енергомоніторингу на підприємствах молочної галузі / А. О. Гоєнко, аспірант, наук. керівник: канд. техн. наук, доцент А. В. Чернявський, КПІ ім. Ігоря Сікорського....	152
Єгор ТІТОВ Вплив режимів навантаження на форму кривої напруги синхронного генератора дизель-електрогенераторної установки / Є. О. Тітов, аспірант, наук. керівник: канд. техн. наук, доцент М.А. Коваленко, КПІ ім. Ігоря Сікорського.....	160
Andrii TRACHUK and Maxym SHUMEIKO Ways to increase energy security of Ukraine’s energy complex by intensifying the development of solar energy / Andrii Trachuk, PhD student, Maxym Shumeiko, Bachelor student, scientific supervisor: Dr. Sc. (Eng.), Professor Stephan Zaichenko, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute.....	167
Євген КОЗЛОВСЬКИЙ Визначення джерела провалу напруги відносно межі балансової належності / Є. В. Козловський, аспірант, наук. керівник: д-р техн. наук, професор А. В. Волошко, КПІ ім. Ігоря Сікорського.....	174
ВУ Дзя Вей Проектування системи управління літальним апаратом типу Fly-by-Wire на основі моделі прогнозного управління / Ву Дзя Вей, магістрант, наук. керівник: канд. техн. наук, доцент А. В. Торопов, КПІ ім. Ігоря Сікорського.....	180

Роман ДУХНО Випробувальна система для контролю якості ізоляції електричних машин в процесі виробництва та ремонту / Р. П. Духно, аспірант, наук. керівник: канд. техн. наук, професор В. В. Чумак, КПІ ім. Ігоря Сікорського..	185
Артем РАЙЧЕНКО Оптимізація резервного електропостачання комунально-побутових об'єктів із застосуванням установок зберігання енергії / А. Є Райченко, аспірант, наук. керівник: канд. техн. наук, доцентка О. С. Ярмолук, КПІ ім. Ігоря Сікорського.....	190
Антон ПРАСОЛ Оптимізація роботи BESS з урахуванням циклів вартості заряду і розряду за допомогою лінійного програмування / А. А. Прасол, аспірант, наук. керівник: канд. техн. наук, доцентка О. В. Бориченко, КПІ ім. Ігоря Сікорського.....	196
Максим ДЗЬОБА Обґрунтування параметрів протизсувних конструкцій для забезпечення стійкості прибортових масивів / М. В. Дзьоба, аспірант, наук. керівник: д-р техн. наук, професор О. О. Фролов, КПІ ім. Ігоря Сікорського.....	202
Богдан ЛІСОВИК Роль, переваги та перспективи енергетичних островів в електроенергетичних системах / Б. А. Лісовик, аспірант, наук. керівник: канд. техн. наук, доцентка О. В. Бориченко, КПІ ім. Ігоря Сікорського.....	207
Віталій ГОЛУБ Застосування штучного інтелекту для визначення точки максимальної потужності в сонячних панелях / В. А. Голуб, аспірант, наук. керівник: канд. техн. наук, професор Ю. О. Шепетов, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського “Харківський авіаційний інститут”.....	212
Богдан ПАШКЕВИЧ Використання двосторонніх (bifacial – біфракційних) сонячних панелей для покращення енергоефективності СЕС / Б. П. Пашкевич, аспірант, наук. керівник: канд. техн. наук, доцент В. П. Калінчик, КПІ ім. Ігоря Сікорського.....	219
Адам БОДЮК Стратегічні перспективи паливно-енергетичних ресурсів / А. В. Бодюк, канд. екон. наук, с. н. с., науково-дослідний заклад “Ресурси”.....	223

ПЕРЕДМОВА

Проблеми раціонального енергокористування одними з перших почали досліджувати фахівці Київського політехнічного інституту. Група молодих науковців, очолювана Артуром Веніаміновичем Праховником, під керівництвом завідуючого кафедрою електропостачання професора Василя Миколайовича Винославського ще наприкінці 60-х років минулого століття започаткувала розробки у сфері енергозбереження та управління режимами електроспоживання з використанням локальних пристроїв, на базі яких в подальшому почали створювати перші автоматизовані системи обліку електроенергії (АСОЕ). Саме науковцями КПІ було обґрунтовано і доведено практично, що головною метою створення АСОЕ є ефективне використання електричної потужності (електроенергії) через формування інформаційного забезпечення завдань управління режимами електроспоживання, і закладено методологічний базис застосування АСОЕ для управління енерговикористанням. Згодом АСОЕ дістали подальшого розвитку і стали підкласом більш широкого класу автоматизованих систем контролю, обліку та управління енерговикористанням (АСКОЕ). Термін АСКОЕ також часто застосовується у вузькому сенсі – автоматизовані системи комерційного обліку електроенергії.

З тих самих часів КПІ ім. Ігоря Сікорського беззаперечно визнано однією з провідних навчальних і наукових установ в царині енергозбереження, підвищення рівня енергетичної ефективності, автоматизації обліку електроенергії та управління енерговикористанням. До речі, саме в Інституті енергозбереження та енергоменеджменту (ІЕЕ) Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут” в 1997 році вперше в Україні було розпочато підготовку студентів, а згодом і перепідготовку та підвищення кваліфікації фахівців за новою спеціальністю – “Енергетичний менеджмент”.

Відкриття нової спеціальності дозволило Україні в стислі терміни забезпечити різні сфери діяльності кваліфікованими фахівцями енергоменеджерами та енергоаудиторами і опанувати новітні технології ефективного використання енергетичних ресурсів у відповідь на критичні виклики – вичерпність запасів викопного палива та зростання шкідливих викидів у довкілля, і як наслідок – загрози глобального потепління. Але ефективне енерговикористання лише частково розв’язує зазначені проблеми.

І тоді зусилля було спрямовано на розвиток розосереджених генерувальних установок на базі альтернативних та відновлюваних джерел енергії, що концептуально перетворило весь ланцюжок перетворення і використання енергії від генерації до кінцевого користувача і дозволило сформулювати базові засади енергетики сталого розвитку, які полягають у синергетичному поєднанні переваг вдосконаленої традиційної енергетики, підвищення ефективності використання енергетичних ресурсів, розвитку розосередженої генерації на базі ВДЕ разом із застосуванням установок

зберігання енергії різної фізичної природи та управління попитом, що разом спирається на розвинуті системи енергетичного менеджменту. Головною прагматичною метою є скорочення використання викопного палива і зменшення шкідливого тиску на довкілля, що в цілому сприятиме запобіганню змінам клімату.

І сьогодні молоді дослідники під керівництвом досвідчених наставників – послідовників наукових шкіл видатних українських науковців і освітян продовжують дослідження на новітній технологічній основі, сконцентрувавши зусилля на цифровізації і застосуванні технологій штучного інтелекту та інших провідних технологіях задля сталого розвитку.

Олег КОЦАР

Степаненко В. А., аспірант, ORCID 0000-0001-6176-589X,
науковий керівник: канд. техн. наук, доцент А. І. Замулко,
Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

ОСОБЛИВОСТІ ВРАХУВАННЯ КОЕФІЦІЄНТА ЕФЕКТИВНОСТІ ІНТЕГРАЦІЇ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ ПРИ ФОРМУВАННІ ТАРИФУ НА ПОСЛУГИ З РОЗПОДІЛУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

PECULIARITIES OF TAKING INTO ACCOUNT THE EFFICIENCY COEFFICIENT OF RENEWABLE ENERGY SOURCES INTEGRATION IN THE FORMATION OF THE TARIFF FOR ELECTRICITY DISTRIBUTION SERVICES

Анотація. Поява відновлюваних джерел енергії в різних точках електричної мережі може спричинити нові виклики перед оператором системи розподілу, які складно передбачити і контролювати. В той же час присутня моральна та фізична зношеність розподільних електричних мереж. Приєднання нових джерел доповнює ці проблеми новими викликами, що вимагає комплексного підходу до модернізації та управління електромережами. Основою режимної взаємодії між операторами системи розподілу та власниками відновлюваних джерел енергії може стати впровадження ефективної системи економічних заходів, серед яких центральне місце посідає використання тарифів на послуги з розподілу електроенергії. Бібл. 6, рис. 2.

Ключові слова: розподільна електрична мережа, відновлювані джерела енергії, інтеграція, диференціація тарифів на послуги з розподілу електроенергії, управління.

Abstract. The emergence of renewable energy sources in different parts of the power grid may bring new challenges to the distribution system operator that are difficult to predict and control. At the same time, there is a moral and physical deterioration of the distribution power grids. The connection of new sources adds new challenges to these problems, which requires an integrated approach to the modernization and management of power grids. The basis of the regime of interaction between distribution system operators and owners of renewable energy sources may be the introduction of an effective system of economic measures, among which the use of tariffs for electricity distribution services is central. Ref. 6, Fig. 2.

Keywords: electricity distribution network, renewable energy sources, integration, differentiation of tariffs for electricity distribution services, management.

Вступ. Розвиток відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) в Україні спрямований на забезпечення дотримання міжнародних стандартів, принципів та практик Європейського Союзу, а запланований рівень виробництва електричної енергії з ВДЕ задовольнятиме потреби суспільства та національної економіки в паливно-енергетичних ресурсах у економічно ефективний, технічно надійний, екологічний та безпечний спосіб, гарантуватиме енергетичну безпеку як в мирний час, так і в умовах надзвичайних ситуацій.

Проте, збільшення проникнення ВДЕ з їх стохастичними характеристиками створює нові ризики для нормального функціонування розподільних електричних мереж, що не були розраховані на такий тип джерел. Через це є невідповідність фізичних параметрів поставленої споживачам електричної енергії до встановлених стандартів внаслідок генерації з ВДЕ.

Метою досліджень є розробка та впровадження системи управління інтеграцією ВДЕ до розподільних електричних мереж шляхом застосування ринкових механізмів. Для досягнення поставленої мети в статті розв'язано такі завдання, як дослідження та використання економічних (непрямих) методів управління інтеграцією ВДЕ до розподільних мереж.

Матеріал і результати досліджень. Існуючі проблеми в експлуатації, організації та політиці стимулювання призвели до нерівномірного розподілу за типами ВДЕ та неефективного використання енергії. Для вирішення цих проблем необхідно внести корективи до планування приєднання ВДЕ до мережі та скоординованого механізму віддачі електроенергії з ВДЕ, підключених до мережі.

Технічні умови (ТУ) є важливим інструментом регулювання відносин між операторами систем розподілу (ОСР) та власниками ВДЕ. Вони регламентують технічні аспекти підключення ВДЕ до електромережі та виступають моделлю взаємодії цих двох сторін. ТУ, попри їх важливість, покривають лише технічну сторону питання приєднання ВДЕ до мережі. Вони забезпечують початкову відповідність параметрів об'єктів ВДЕ до вимог мережевої інфраструктури, таких як рівні напруги, допустимі коливання частоти, пропускна здатність мережі тощо. Проте ТУ не враховують довгострокового впливу роботи ВДЕ на функціонування енергосистеми та не передбачають механізмів контролю чи відповідальності за можливе погіршення умов її експлуатації.

В цій роботі розглядаються операційні ризики, що спричинені безпосереднім функціонуванням ВДЕ в мережі та пов'язані з динамічним характером генерації, залежним від погодних умов, і можливими порушеннями якості електроенергії, такими як відхилення напруги, коливання частоти та зростання навантаження на вузли мережі тощо. Надалі під ризиками в роботі будуть матися такі операційні ризики.

Для мінімізації ризиків необхідно розробити систему управління, яка базуватиметься на ринкових механізмах. У такій системі кожен учасник буде нести фінансову відповідальність за вплив на стан мережі, сплачуючи за створені ним погіршення. Це дозволить збалансувати інтереси ОСР і виробників ВДЕ, сприяти відповідальній генерації та стимулювати мінімізацію негативних технічних наслідків для енергосистеми.

Концепція справедливості у формуванні тарифів для розподільчих мереж може мати різні інтерпретації. Справедливість часто пов'язують з відображенням витрат, що є основною темою 4-го енергетичного Пакету: а саме, що тарифи, з якими стикаються споживачі та виробники, повинні відображати витрати, які вони спричиняють. Це можна розглядати як

економічно ефективний підхід з двох широких точок зору. По-перше, з точки зору системи, якщо власник ВДЕ сплачує вартість свого впливу на мережу, його участь не є ні тягарем, ні бонусом для решти системи. По-друге, з індивідуальної точки зору, він приймає рішення про виробництво (в даному випадку, чи підключатися, залишатися підключеним та користуватися системою розподілу, в який час та на яких умовах) відповідно до витрат, які він зумовлює, користуючись мережею. Стратегічні цілі Ради європейських енергетичних регуляторів включають “...забезпечення того, щоб усі споживачі отримували вигоду у справедливий спосіб, зокрема через ефективність мережевого тарифу, та сприяння участі споживачів без дискримінації між споживачами/продавцями” [1].

У розподільних мережах традиційно переважали користувачі, які покладалися виключно на мережу для постачання електроенергії, а витрати в основному відшкодовувалися відповідно до використання мережі за рахунок плати за обсяг споживання. Зі зміною структури попиту та пропозиції, витрати на мережу все більше визначаються зростанням вбудованої генерації; отже, оператори розподільних мереж стикаються з ризиками щодо обсягів та доходів. Тарифи на основі впливу на мережу, які краще відображають основний фактор мережевих витрат, є важливими інструментами для оптимізації використання мереж та підвищення гнучкості, а також можуть допомогти нейтралізувати вплив коливань об’ємного споживання на доходи ОСР. Гнучкість можна запровадити за допомогою інших механізмів, наприклад, аукціонів для оплати гнучкості через агрегаторів або більш конкретних домовленостей щодо зменшення навантаження за необхідності. Ефект буде схожим у тому, що витрати/вигоди відображатимуться у нижчих цінах для тих, хто може запропонувати таку гнучкість. Одним з основних методів управління інтеграцією ВДЕ, що використовується в рамках підходу регулювання на основі результатів діяльності, є схема винагороди-штрафів. Це грошовий інструмент, який здатний стимулювати власників ВДЕ до забезпечення нормативних умов функціонування системи розподілу.

Якщо взяти за основу застосування схеми “винагорода-штраф” як фінансової стратегії, розробленої регулятором для уникнення погіршення надійності послуг, то існує три основні підходи до розробки такої схеми. Перший фокусується на споживачах та їхньому баченні цієї схеми. У роботі [2] схема “винагорода-штраф” базується на тарифах, можливому страхуванні на основі показників надійності та диференційованих цінах на послуги. Інші підходи намагаються адаптувати схеми “винагорода-штраф” до нижчих ієрархічних рівнів для окремих фідерів та шин [3] або з використанням передових даних вимірювальної інфраструктури.

Другий підхід пов’язаний з оптимізацією параметрів ВДЕ для комунальних підприємств. Одним з ключових елементів управління є визначення граничних балів заохочень та штрафів, а також порогових показників або цільових показників, які окреслюють “базову зону”, тобто рівень ефективності, який не передбачає ані штрафів, ані заохочень. Вибір

цих параметрів зазвичай вирішується як оптимізаційна задача з мінімізацією витрат та максимізацією необхідної надійності або бюджету на обслуговування [4]. Зважені схеми “винагорода-штраф” на основі їх впливу на мережу об’єднуються для визначення вартості тарифу для кожного суб’єкта. В обох підходах, описаних вище, параметри схеми визначалися відповідно до єдиної історії енергофункціонування, незалежно від показників інших компаній.

У третьому підході (конкуренція за еталоном) регульовані ціни базуються не на минулих чи прогнозованих показниках діяльності суб’єкту, а на показниках діяльності інших. Конкуренція за допомогою еталонних показників використовує метод порівняльного аналізу, наприклад, метод порівняльного аналізу на основі граничних показників або середніх та середніх показників. Всебічний аналіз методів бенчмаркінгу та їхнього значення для регуляторних органів наведено в роботі [5], де підкреслюється потреба в органах, які вимагатимуть від фірм збирати, перевіряти та аналізувати дані про результати діяльності.

Другий підхід для розробки та впровадження схеми “винагорода-штраф” виглядає більш придатним для реалізації в досліджуваних умовах, оскільки дозволяє використовувати оптимізаційну задачу для визначення параметрів заохочень, штрафів. Для застосування даної схеми розглянуто перелік складових частин витрат на послуги з розподілу електричної енергії, що включаються в розрахунок тарифу на 2024 рік для 23 ОСР. Були визначені витрати, які безпосередньо стосуються технічного обслуговування та експлуатації електромереж. До них належать витрати на купівлю електроенергії для компенсації технологічних втрат; дефіцит або профіцит коштів, пов’язаний із приєднанням нових електроустановок; коригування доходу відповідно до показників якості; а також амортизація.

На основі цього необхідно обчислити частку витрат на технічне обслуговування як відношення суми вибраних витрат до загальних витрат. Це дозволяє оцінити, яку частину загального тарифу спрямовано саме на технічну експлуатацію та підтримку роботи мереж, включаючи приєднання нових джерел. Значення часток варіюються в межах від 0,323 (найнижче для “СУМІОБЛЕНЕРГО”) до 0,546 (найвище для “ХЕРСОНОБЛЕНЕРГО”). Середнє значення частки становить 0,449, що означає, що в середньому 45 % загальних витрат ОСР спрямовано на технічне обслуговування та експлуатацію мереж. Результати відображені на рис. 1.

Для впровадження механізму управління інтеграцією ВДЕ до розподільних мереж на основі тарифів на розподіл можна використати коефіцієнт ефективності інтеграції $k_{ef.integ.}$, що було отримано в попередніх дослідженнях [6]. У діапазоні $k_{ef.integ.}$ від 0,55 до 0,65 забезпечується відповідність нормативним параметрам якості електроенергії, тому в цьому проміжку доцільно створити зону нечутливості, де діє базовий тариф на розподіл без застосування штрафів чи винагород. Це дозволяє зберігати

стабільність тарифів для об'єктів, які інтегруються в мережу без значного технічного впливу.

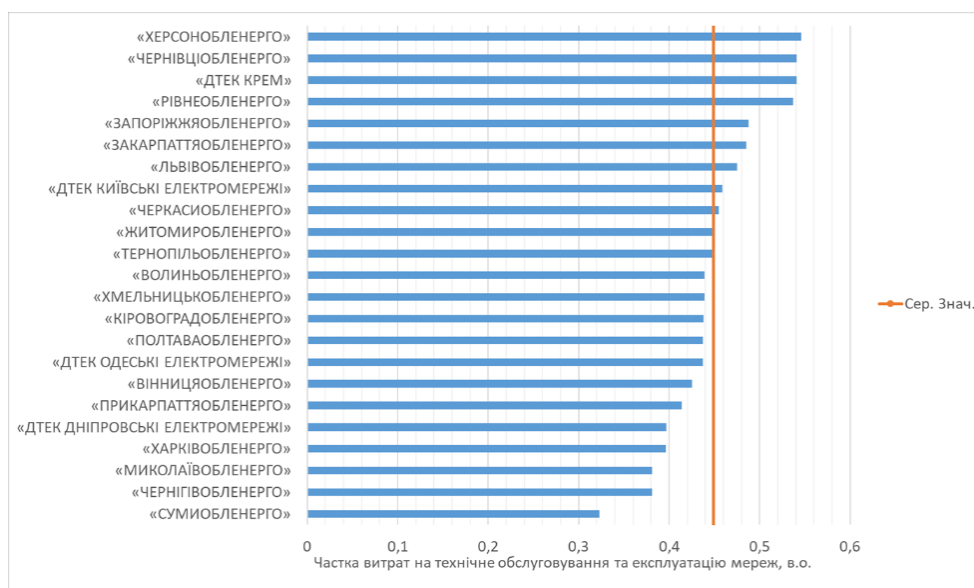


Рисунок 1. Аналіз структури тарифів на послуги з розподілу електричної енергії

Для стимулювання власників ВДЕ, чиї установки спричиняють вихід $k_{ef.integ.}$ за межі зони нечутливості, застосовуються штрафи або винагороди. Діапазон $k_{ef.integ.}$ може змінюватися від 0,163 до 0,837, що дає змогу побудувати схему диференціації тарифу. Водночас максимальний розмір штрафу або винагороди не може перевищувати 45 % базового тарифу, що гарантує економічну збалансованість системи. Використовуючи дані положення було отримано тариф на послуги з розподілу електричної енергії на основі коефіцієнта ефективності інтеграції ВДЕ, що графічно зображено на рис. 2.

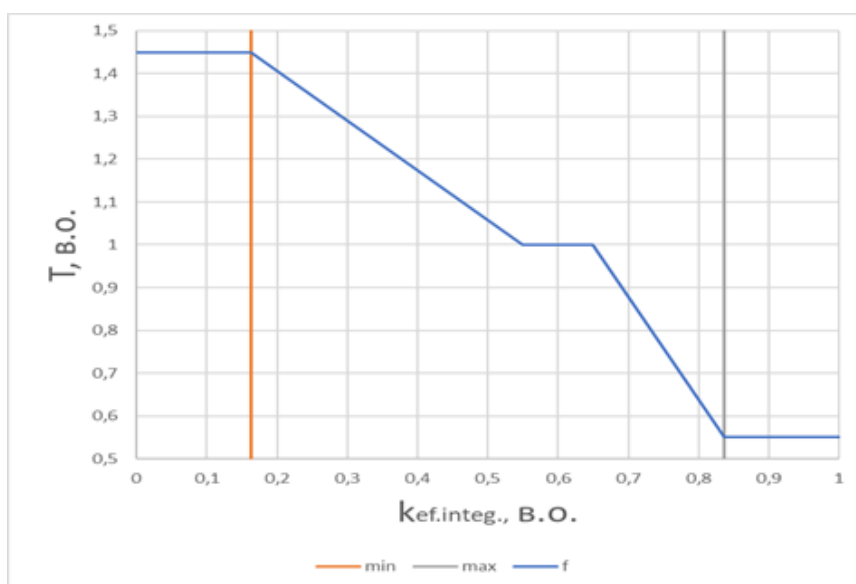


Рисунок 2. Графік залежності тарифу на послуги з розподілу електричної енергії від коефіцієнта ефективності інтеграції ВДЕ

Така модель створює економічні стимули для покращення технічних показників інтеграції ВДЕ. Об'єкти з низьким $k_{ef.integ.}$ будуть зацікавлені у вжитті заходів для зниження негативного впливу на мережу, таких як встановлення систем накопичення енергії чи оптимізація графіка генерації. Натомість об'єкти з високим $k_{ef.integ.}$ отримають винагороду, що компенсує витрати на підтримку якості електроенергії.

Висновки. Основою режимної взаємодії між ОСР та власниками ВДЕ може стати впровадження ефективної системи економічних заходів, серед яких центральне місце посідає використання тарифів на послуги з розподілу електроенергії. Такий підхід дозволяє враховувати реальний вплив кожного виробника на мережу, стимулюючи їх до дотримання технічних вимог, зменшення коливань генерації та оптимізації навантаження на інфраструктуру.

Проведений аналіз структури тарифу на послуги з розподілу дозволив визначити ключові складові витрат, пов'язаних із технічним обслуговуванням та експлуатацією електричних мереж. Розрахунок частки витрат на технічне обслуговування у структурі загальних витрат дав змогу оцінити вплив цих витрат на кінцевий тариф. Це, у свою чергу, дозволяє формувати обґрунтовані рішення щодо тарифної політики, спрямованої на стабільне функціонування мереж та інтеграцію нових джерел генерації. Для гарантування ринкової збалансованості розраховано максимальний розмір штрафу та винагороди, який не може перевищувати 45 % від базового тарифу.

Список використаних джерел

1. CEER 2023 Work Programme. CEER. URL: <https://www.ceer.eu/wp-content/uploads/2024/04/Work-Programme-2023.pdf> (дата звернення 12.12.2024).
2. Reliability indices applied to performance-based mechanisms in electric power distribution systems / A. M. Leite da Silva та ін. International Journal of Systems Assurance Engineering and Management. 2010. vol. 1, No. 2. pp. 105–112. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13198-010-0019-4> (дата звернення 02.01.2025).
3. New reward and penalty scheme for electric distribution utilities employing load-based reliability indices / B. Wang та ін. IET Generation, Transmission & Distribution. 2018. T. 12, № 15. pp. 3647–3654. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2017.1809> (дата звернення 06.01.2025).
4. Ghasemi M., Dashti R. Designing a decision model to assess the reward and penalty scheme of electric distribution companies. Energy. 2018. vol. 147. pp. 329–336. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.01.021> (дата звернення 04.01.2025).
5. Joskow P. L. Incentive Regulation in Theory and Practice: Electricity Distribution and Transmission Networks. 2006. 63 p.
6. Stepanenko V., Zamulko A., Veremiichuk Y. Fuzzy logic in the decision-making tasks of connecting renewable energy sources into the electricity supply system. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2023. vol. 1254, No. 1. P. 012043. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1254/1/012043> (дата звернення 08.01.2025).

References

1. CEER 2023 Work Programme. CEER. URL: <https://www.ceer.eu/wp-content/uploads/2024/04/Work-Programme-2023.pdf> (accessed 12.12.2024).

2. Reliability indices applied to performance-based mechanisms in electric power distribution systems / A. M. Leite da Silva та ін. International Journal of Systems Assurance Engineering and Management. 2010. vol. 1, No. 2. pp. 105–112. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13198-010-0019-4> (accessed 02.01.2025).
3. New reward and penalty scheme for electric distribution utilities employing load-based reliability indices / B. Wang та ін. IET Generation, Transmission & Distribution. 2018. vol. 12, N. 15. pp. 3647–3654. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2017.1809> (accessed 06.01.2025).
4. Ghasemi M., Dashti R. Designing a decision model to assess the reward and penalty scheme of electric distribution companies. Energy. 2018. vol. 147. pp. 329–336. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.01.021> (accessed 04.01.2025).
5. Joskow P. L. Incentive Regulation in Theory and Practice: Electricity Distribution and Transmission Networks. 2006. 63 p.
6. Stepanenko V., Zamulko A., Veremiichuk Y. Fuzzy logic in the decision-making tasks of connecting renewable energy sources into the electricity supply system. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2023. vol. 1254, No. 1. pp. 012043. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1254/1/012043> (accessed 08.01.2025). (Ukr).

УДК 631.311

Лугін Д. М., магістрант, ORCID 0009-0009-8814-5944,
науковий керівник: канд. техн. наук, доцент Т. Л. Кацадзе,
Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

АНАЛІЗ КОМУТАЦІЙНИХ ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМІВ В ДАЛЬНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ НАПРУГОЮ 400 кВ

ANALYSIS OF COMMUTATIONAL TRANSITION MODES IN A 400 kV LONG-DISTANCE POWER TRANSMISSION

Анотація. В роботі представлено результати дослідження комутаційних перехідних режимів у дальній електропередачі напругою 400 кВ. Розглянуто особливості виникнення комутаційних перенапруг під час експлуатації та маніпуляцій з лініями електропередачі, включаючи постановку під напругу, оперативні перемикавання, та цикли автоматичного повторного ввімкнення. Оцінено вплив запізнення електромагнітної хвилі та можливих резонансних явищ на перенапругу в довгих лініях. Визначено заходи з обмеження перенапруги для забезпечення надійної роботи лінійної ізоляції. Бібл. 9, рис. 5., табл. 1.

Ключові слова. комутаційна перенапруга, перехідний процес, дальня електропередача, ефект Ферранті.

Abstract. The paper presents the results of a study of switching transients in a 400 kV long-distance power transmission line. The peculiarities of switching overvoltages during operation and manipulation of power lines, including energization, operational switching, and automatic reclosing cycles, are considered. The influence of electromagnetic wave delay and possible resonance phenomena on overvoltage in long-distance lines is estimated. Measures to limit the overvoltage to ensure reliable operation of line insulation are determined. Ref. 9, Fig. 5, Tabl. 1.

Keywords. switching overvoltage, transient process, long-distance transmission line, Ferranti effect.

Вступ. Під час експлуатації електропередач надвисокої номінальної напруги особливої уваги потребують задачі аналізу комутаційних перехідних процесів та виникаючих при цьому перенапруг, які утворюються під час встановлення лінії електропередачі під напругу, увімкнення електропередачі в роботу, оперативних перемикань робочої схеми, здійснення циклів автоматичного повторного ввімкнення (АПВ) тощо [1–4]. При цьому слід зважати на жорстке обмеження допустимої перенапруги в електропередачах надвисокої номінальної напруги за умовами роботи лінійної ізоляції [5–7]. Проблема ускладнюється особливостями перебігу перехідних процесів в дальніх електропередачах, де відчувається запізнення електромагнітної хвилі під час її поширення вздовж лінії. Також слід зважати на можливі резонансні явища, котрі підсилюють перенапругу в лініях великої та надвеликої довжини [8].

Метою дослідження є аналіз усталених та комутаційних перехідних процесів в дальній електропередачі напругою 400 кВ та визначення заходів, направлених на обмеження перенапруги.

Для досягнення поставленої мети в роботі розв'язано такі задачі:

1. Створено модель досліджуваної електропередачі в середовищі PowerFactory.
2. Проведено моделювання характерних усталених режимів досліджуваної електропередачі і проаналізовано розподіл напруги, струму та реактивної потужності вздовж лінії.
3. Проведено дослідження комутаційних та аварійних електромагнітних перехідних процесів в досліджуваній лінії електропередавання.
4. Досліджено вплив обмежувачів перенапруги на перебіг перехідних процесів та рівні перенапруги, які виникають в лінії.

Матеріал і результати досліджень. В роботі досліджено електропередачу напругою 400 кВ завдовжки 400 км, виконану в габаритах лінії 750 кВ. Електропередача складається з двох ділянок, перша ділянка довжиною 285 км, виконана пучком з п'яти проводів АС-400 на опорах ПП-750-1, друга ділянка виконана довжиною 115 км виконана пучком з чотирьох проводів АС-525 на опорах U45Р. Електропередача синхронізована з електромережею напругою 750 кВ через групу однофазних автотрансформаторів АОДЦТН-417000/750/400. Для компенсації надлишкової зарядної потужності лінії встановлено групи однофазних шунтувальних реакторів РОМБС-110000/750 та РОДЦ-110000/750 на початку та наприкінці електропередачі відповідно. Розрахункову схему електропередачі в середовищі PowerFactory наведено на рис. 1.

Виконання повітряної лінії в габаритах 750 кВ зумовило збільшення натуральної потужності та пропускної здатності електропередачі, у порівнянні з аналогічною лінією в габаритах 400 кВ, що можна побачити

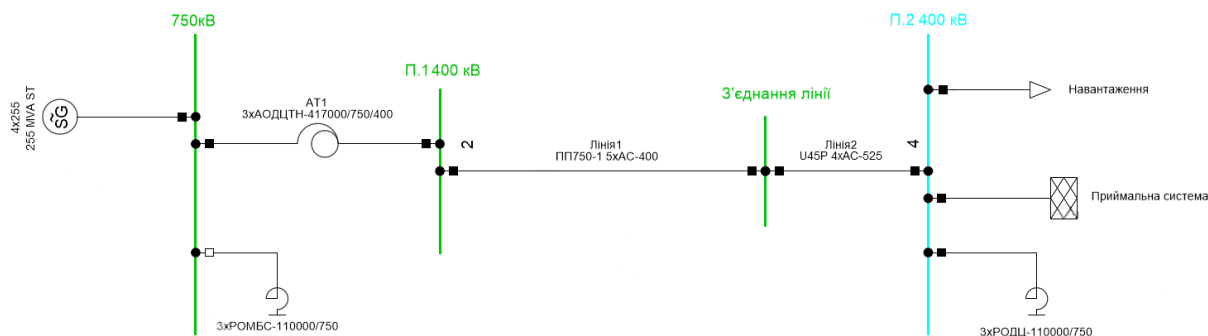


Рисунок 1. Розрахункова схема електропередачі

порівнявши параметри в табл. 1. Також збільшеною є величина зарядної потужності лінії, що впливає на режим напруги в електропередачі та баланс реактивної потужності в суміжних енергосистемах.

Таблиця 1. Електротехнічні параметри лінії в габаритах 750 кВ і 400 кВ

	1-ша Ділянка 750 кВ	2-га Ділянка 750 кВ	Ділянка 400 кВ
довжина, км	285	115	400
погонний резистанс R, Ом/км	0,01465	0,01605	0,02973
погонний реактанс X, Ом/км	0,2237	0,2348	0,3269
погонний суццептанс B, мкСм/км	5,1115	4,8420	3,6105
натуральна потужність, МВт	764,392	726,191	531,085
зарядна потужність, кВАр/км	817,84	774,72	577,68

Аналіз усталених режимів електропередачі показав, що виникнення ефекту Ферранті в лінії зумовлює збільшення напруги в проміжних точках лінії в режимі однобічного увімкнення до 10 % від номінальної напруги електропередачі, що проілюстровано на рис. 2.

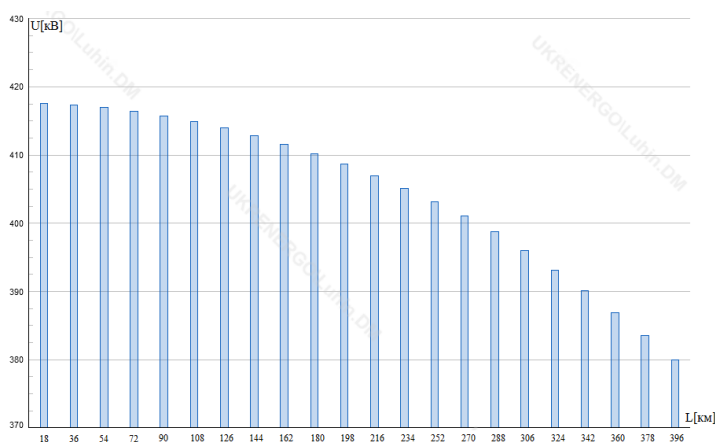
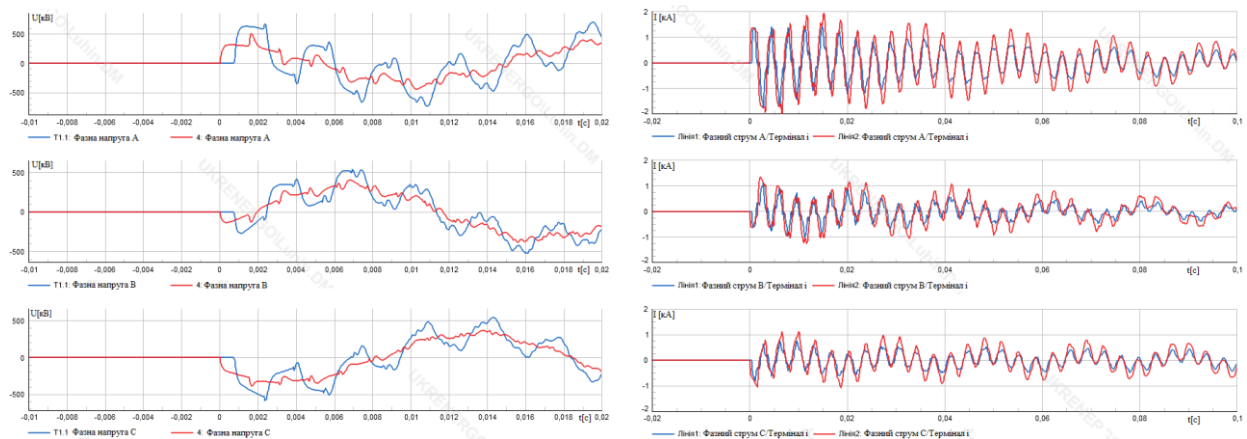


Рисунок 2. Епюра розподілу напруги вздовж лінії в режимі однобічного увімкнення

Ще одна конструктивна особливість досліджуваної лінії полягає в її поздовжній неоднорідності, пов'язаної з виконанням електропередачі такою, що складається з двох ділянок із різними характеристиками. Як наслідок, перебіг перехідних процесів в лінії супроводжується багатократним переломленням електромагнітної хвилі під час поширення вздовж лінії та віддзеркалення від кінців.

Перенапруги, спричинені внутрішніми подіями в лінії, такими як комутації, є однією з головних проблем в системах високої та надвисокої номінальної напруги з точки зору координації ізоляції. Комутаційні перемикання викликають електромагнітні перехідні процеси в електропередачі, які мають тривалість від декількох десятків до декількох тисяч мікросекунд. Вони спричиняють значні спотворення амплітуди напруги та струму, утворюючи складні форми хвиль, характерні для довгих ліній, що показано на рис. 3.



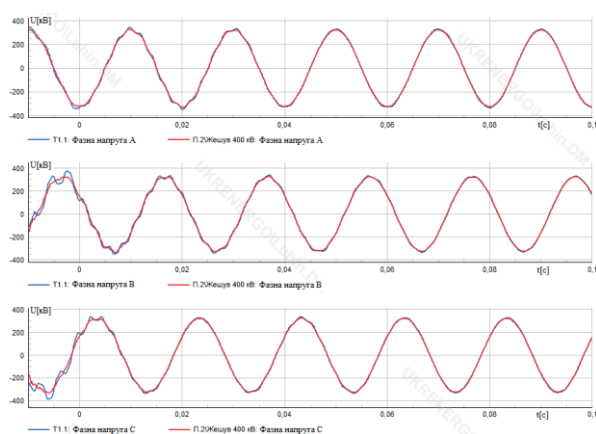
а) миттєві значення напруги

б) миттєві значення струму

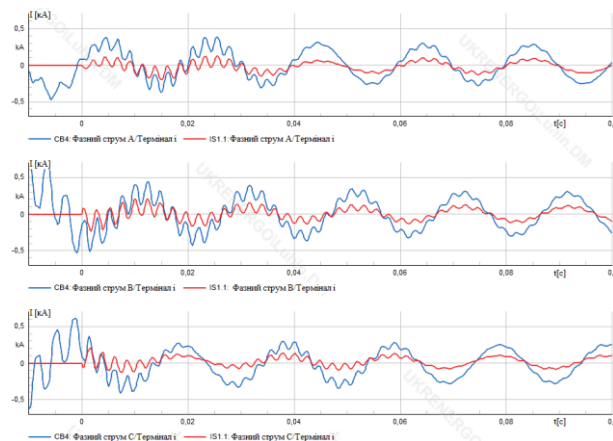
Рисунок 3. Перебіг комутаційного перехідного процесу під час встановлення лінії під робочу напругу

Після комутації відкритого кінця лінії до суміжної енергосистеми спостерігається плавне затухання високочастотної складової напруги та струму з подальшим переходом до усталених коливань без спотворень, що показано на рис. 4.

Повторне включення електропередачі після однофазного короткого замкнення без використання обмежувачів перенапруги (ОПН) показало значні стрибки напруги (див. рис. 5 а) після відновлення живлення, що спричинено наявністю у непошкоджених фазах захопленого заряду, який істотно впливає на величину перехідної перенапруги під час повторного підключення [9]. Ситуація суттєво покращується, якщо використовувати обмежувачі перенапруги. Обмежувач перенапруги – це захисний пристрій, який обмежує перенапруги в електромережі для захисту обладнання шляхом розрядження або обходу імпульсного струму. Його рівень захисту може бути



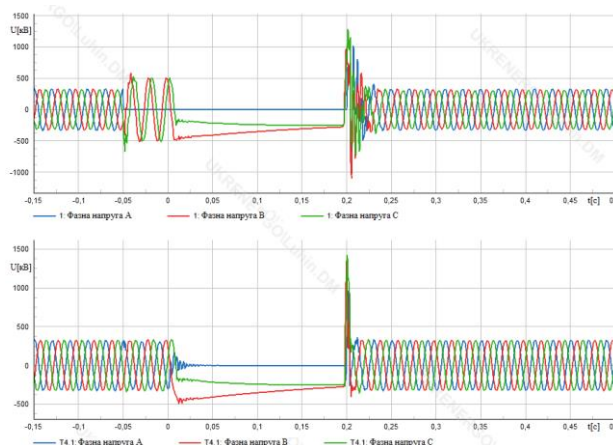
а) миттєві значення напруги



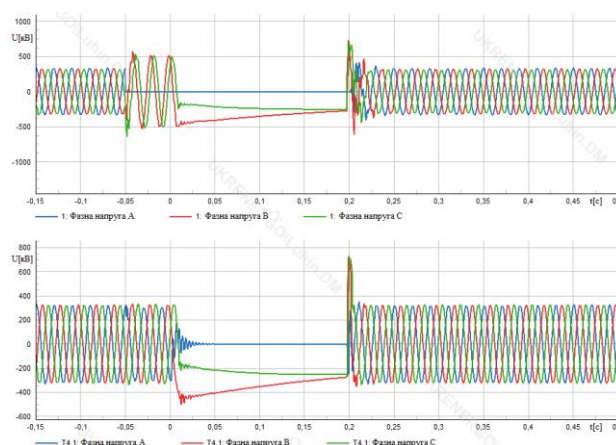
б) миттєві значення струму

Рисунок 4. Перебіг комутаційного перехідного процесу під час підключення лінії без навантаження

обраний для обмеження не лише грозових перенапруг, як у випадку з типовим лінійним обмежувачем перенапруг, а також він може працювати під час комутаційних перенапруг чи тимчасових перенапруг. Під час повторного включення електропередачі після усунення КЗ з ОПН, спостерігається зменшення амплітуди напруги після повторного включення приблизно в півтора рази, що показано на рис. 5 б). Пікова напруга становить до 800 кВ миттєвого значення напруги, що є на 500 кВ меншим, у порівнянні з моделлю без обмежувачів (1300 кВ).



а) без ОПН



б) із застосуванням ОПН

Рисунок 5. Перебіг комутаційного перехідного процесу під час спрацювання трифазного АПВ

Висновки. Виконання лінії напругою 400 кВ в габаритах 750 кВ зумовлює особливості її математично моделі та електротехнічних параметрів, зокрема підвищена натуральна потужність та пропускна здатність лінії. Також через цю особливість спостерігається підвищене значення сусцептансу електропередачі, який в свою чергу впливає на зарядну потужність лінії.

Аналіз усталених режимів електропередачі показав, що велика довжина лінії електропередавання зумовлює виникнення ефекту Ферранті, збільшення профілю напруги в проміжних точках лінії в режимах однобічного увімкнення, ненавантаженої лінії та навантажень, що не перевищують натуральну потужність, та характерні криві розподілу струму та реактивної потужності. Істотна зарядна потужність електропередачі розподіляється між суміжними енергосистемами і впливає на баланс реактивної потужності в них.

Комутаційні перемикання визначають протікання електромагнітних перехідних процесів, характерних для електропередачі великої довжини. Криві миттєвих значень напруги та струму визначаються накладанням падаючої та відбитої хвиль під час комутаційних перемикань. Аналіз електромагнітних перехідних процесів пов'язаних із відновленням роботи лінії після аварійних відключень показав що наявність ОПН зумовлює зниження амплітуди напруги під час комутації для деяких режимів приблизно в півтора рази.

Список використаних джерел

1. Annadi R. R., Patsa C. S. Statistical Switching Overvoltages of 1200 kV UHV AC Transmission Line. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series B*. 2021. URL: <https://doi.org/10.1007/s40031-021-00643-0> (дата звернення 03.03.2025).
2. Simulation of Switching Overvoltages and Validation With Field Tests / M. Cervantes et al. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2018. vol. 33, No. 6. pp. 2884–2893. URL: <https://doi.org/10.1109/tpwrd.2018.2834138> (дата звернення 03.03.2025).
3. Чабан А., Лисяк Г., Левонюк В. Математичне моделювання комутаційних електромагнітних процесів у довгих лініях електропередач у циклі АПВ. *Електроенергетичні та електромеханічні системи*. 2019. С. 63–73. URL: <https://doi.org/10.23939/sepes2019.01.063> (дата звернення 03.03.2025).
4. Шполянський О. Г. Аналіз перехідних процесів при постановці ЛЕП змінного струму під напругу в об'єднаних енергосистемах. *Технічна електродинаміка*. 2022. № 6. С. 58–62. URL: <https://doi.org/10.15407/techned2022.06.058> (дата звернення 03.03.2025).
5. Reddy S. A., Kumari M. S. A review of switching overvoltage modeling in UHV AC transmission lines. *Electric Power Systems Research*. 2024. vol. 236. pp. 110902. URL: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.110902> (дата звернення 03.03.2025).
6. Failure Risk of UHV AC Transmission Line Considering the Statistical Characteristics of Switching Overvoltage Waveshape / Y. Li et al. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2013. vol. 28, No. 3. pp. 1731–1739. URL: <https://doi.org/10.1109/tpwrd.2013.2252238> (дата звернення 03.03.2025).
7. Shim E., Zaima E. Introduction of Insulation Coordination for UHV AC Systems. *Journal of Electrical Engineering and Technology*. 2015. vol. 10, No. 3. pp. 1293–1297. URL: <https://doi.org/10.5370/jeet.2015.10.3.1293> (дата звернення 03.03.2025).

8. Кучанський В. В. Оцінка впливу конструкції фази лінії електропередачі надвисокої напруги на аномальні резонансні перенапруги. Праці інституту електродинаміки Національної академії наук України. 2019. № 52. С. 22–27. URL: <https://doi.org/10.15407/publishing2019.52.022> (дата звернення 03.03.2025).

9. Martinez J. A., Goldsworthy D., Horton R. Switching Overvoltage Measurements and Simulations–Part I: Field Test Overvoltage Measurements. IEEE Transactions on Power Delivery. 2014. vol. 29, No. 6. pp. 2502–2509. URL: <https://doi.org/10.1109/tpwrd.2014.2303575> (дата звернення 03.03.2025).

References

1. Annadi R. R., Patsa C. S. Statistical Switching Overvoltages of 1200 kV UHV AC Transmission Line. Journal of The Institution of Engineers (India): Series B. 2021. URL: <https://doi.org/10.1007/s40031-021-00643-0> (accessed 03.03.2025).

2. Simulation of Switching Overvoltages and Validation With Field Tests / M. Cervantes et al. IEEE Transactions on Power Delivery. 2018. vol. 33, No. 6. pp. 2884–2893. URL: <https://doi.org/10.1109/tpwrd.2018.2834138> (accessed 03.03.2025).

3. Chaban A., Lisyak G., Levonyuk V. Mathematical modeling of switching electromagnetic processes in long power lines in the recloser cycle. Elektroenergetichni ta elektromehanichni sistemi. 2019. pp. 63–73. URL: <https://doi.org/10.23939/sepes2019.01.063> (accessed 03.03.2025). (Ukr).

4. Shpolianskii O. G. Analysis of transient processes during energisation of the AC overhead transmission line in the hybrid power systems. Tekhnichna Elektrodynamika. 2022. No. 6. pp. 58–62. URL: <https://doi.org/10.15407/teched2022.06.058> (accessed 03.03.2025) (Ukr).

5. Reddy S. A., Kumari M. S. A review of switching overvoltage modeling in UHV AC transmission lines. Electric Power Systems Research. 2024. vol. 236. P. 110902. URL: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.110902> (accessed 03.03.2025).

6. Failure Risk of UHV AC Transmission Line Considering the Statistical Characteristics of Switching Overvoltage Waveshape / Y. Li et al. IEEE Transactions on Power Delivery. 2013. vol. 28, No. 3. pp. 1731–1739. URL: <https://doi.org/10.1109/tpwrd.2013.2252238> (accessed 03.03.2025).

7. Shim E., Zaima E. Introduction of Insulation Coordination for UHV AC Systems. Journal of Electrical Engineering and Technology. 2015. vol. 10, No. 3. P. 1293–1297. URL: <https://doi.org/10.5370/jeet.2015.10.3.1293> (accessed 03.03.2025).

8. Kuchanskyi V. V. Phase structure influence estimation of the extra high voltage line on abnormal resonance overvoltages. Praci Institutu elektrodinamiki Nacionalnoi akademii nauk Ukraini. 2019. No. 52. pp. 22–27. URL: <https://doi.org/10.15407/publishing2019.52.022> (accessed 03.03.2025). (Ukr).

9. Martinez J. A., Goldsworthy D., Horton R. Switching Overvoltage Measurements and Simulations–Part I: Field Test Overvoltage Measurements. IEEE Transactions on Power Delivery. 2014. vol. 29, No. 6. pp. 2502–2509. URL: <https://doi.org/10.1109/tpwrd.2014.2303575> (accessed 03.03.2025).

Кіянчук В. М., аспірант, ORCID 0000-0002-7765-3910,
науковий керівник: канд. техн. наук, с. н. с. **К. В. Махотіло**,
Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”

ВИКОРИСТАННЯ ВОДОНАГРІВАЧІВ ДЛЯ РЕАГУВАННЯ НА ПОПИТ В ЕНЕРГОСИСТЕМІ

UTILIZING WATER HEATERS FOR DEMAND RESPONSE IN POWER SYSTEMS

Анотація. У статті досліджено енергоефективність та енергетичну безпеку через впровадження програм реагування на попит. Проаналізовано підходи до управління попитом і технічну готовність побутових водонагрівачів до використання як керованих навантажень. Запропоновано методи моделювання режимів роботи споживачів-регуляторів та алгоритми реагування у “розумних” мережах. Проведено натурні експерименти з вимірювання параметрів водонагрівачів, створено та верифіковано їхню математичну модель в OpenModelica. Отримані експериментальні результати підтверджують ефективність керування водонагрівачами в межах програм реагування на попит для зниження пікових навантажень і підвищення стабільності енергосистеми. Бібл. 3, рис. 4.

Ключові слова: реагування на попит, розумна мережа, водонагрівач, енергоефективність, балансування, агрегатор, гнучкі ресурси.

Abstract. The article explores energy efficiency and security through the implementation of demand response programs. Approaches to demand management and the technical readiness of household water heaters as controllable loads have been analyzed. Methods for modeling the operating modes of consumer regulators and response algorithms in smart grids have been proposed. Field experiments measuring water heater parameters were conducted, and their mathematical model was developed and validated in OpenModelica. The obtained experimental results confirm the effectiveness of water heater control within demand response programs in reducing peak loads and improving power system stability. Ref. 3, Fig. 4.

Keywords: demand response, smart grid, water heater, energy efficiency, balancing, aggregator, flexible resources.

Вступ. Зростаючий попит на електричну енергію та обмеженість ресурсів маневрової генерації зумовлюють необхідність пошуку нових підходів до управління енергетичними ресурсами. Питання енергоефективності та енергетичної безпеки стають особливо актуальними, оскільки енергетична система потребує гнучких рішень для балансування генерації та споживання. Впровадження інноваційних технологій управління споживанням електричної енергії дозволяє не лише зменшити витрати для споживачів, а й сприяє сталому розвитку відновлюваної енергетики, забезпечуючи стабільність енергосистеми. Одним із перспективних напрямів є впровадження програм реагування на попит, які підвищують надійність енергетичної системи завдяки інтеграції гнучких механізмів адаптації до змін навантаження. Особливу роль може відігравати залучення побутових

споживачів до таких програм шляхом використання енергоємних приладів, зокрема водонагрівачів, як регульованих навантажень.

Мета і завдання досліджень. Метою дослідження є розробка методів моделювання режимів роботи споживача-регулятора та алгоритмів реагування на попит з метою підвищення ефективності управління споживанням електроенергії в “розумних” мережах. Для досягнення цієї мети необхідно здійснити аналіз існуючих програм реагування на попит, дослідити потенціал побутових споживачів, зокрема оцінити можливості використання водонагрівачів як гнучких ресурсів, а також проаналізувати вплив сезонних і добових коливань на споживання електроенергії. Крім того, потрібно виявити ключові фактори, що впливають на ефективність реагування на попит, розробити відповідні рекомендації для їх впровадження в Україні та експериментально оцінити можливості реалізації ресурсу та запропонованих підходів.

Результати досліджень. Управління попитом – всеохоплюючий або інтегрований підхід, спрямований на здійснення впливу на обсяг та графік споживання електричної енергії з метою зменшення споживання первинної енергії та максимальних (пікових) навантажень. Для побутових споживачів реагування на попит – це система тарифів або спеціальна програма агрегатора, спрямована на стимулювання змін у моделях споживання електричної енергії відповідно до їх базової лінії споживання у відповідь на зміни цін на електроенергію з часом або через пряму активацію диспетчером.

Участь споживачів у реагуванні на попит вимагає розвиненої двоспрямованої комунікаційної інфраструктури, вдосконалених систем вимірювання, ефективних тарифних моделей та інтелектуальних алгоритмів енергоменеджменту. З поширенням технологій “розумних” мереж і автоматизованих систем реагування програми керування попитом стають ключовим елементом, що забезпечує економічно ефективну альтернативу традиційному збільшенню генеруючих потужностей, які використовуються для балансування енергетичної системи [1].

Одним із перспективних рішень для реалізації таких програм є використання побутових водонагрівачів, оснащених технологіями “розумного” будинку. Вони можуть акумулювати тепло у години низьких тарифів або під час надлишку електроенергії від відновлюваних джерел, а також знижувати навантаження на мережу в пікові періоди. Було проведено аналіз і визначення типового побутового водонагрівача з урахуванням його ключових параметрів та конструктивних особливостей. За даними інтернет-порталу Hotline.ua, станом на початок 2024 року найбільш поширеними на ринку є електричні накопичувальні водонагрівачі (ЕНВ), які значно переважають проточні моделі – 83,66 % проти 16,33 %. Типовий вибір споживачів – це ЕНВ об’ємом від 50 до 100 літрів, з потужністю від 1,6 до 2 кВт [1]. Розподіл частки пропозиції на ринку України різних моделей ЕНВ за об’ємом та потужністю наведено на рис. 1.

Натурні експерименти є ключовим інструментом для пошуку оптимальних методів реагування на попит. Дослідна установка ЕНВ оснащена “розумним” лічильником для щохвилинного вимірювання струму, напруги та потужності, а також реєстратором температури для контролю стану води в баку. “Розумна” розетка забезпечує дистанційне керування, імітуючи команди агрегатора. Зібрані дані дозволяють аналізувати структуру споживання та пікові навантаження, що є основою для розробки адаптивних алгоритмів керування, здатних оперативно реагувати на зміни та підвищувати ефективність реагування на попит.

Дослідження експериментального ЕНВ містить понад рік історичних даних електричних та теплових параметрів його роботи, що дозволяє проводити детальний аналіз режимів його роботи та енергоспоживання. Під час проведення експерименту було зібрано дані щодо фактичного споживання водонагрівачем потужності з мережі, на основі чого було побудовано базовий добовий профіль споживання. Наявність базового профілю споживання дає змогу оцінити можливості щодо реагування на попит, а також потрібна для оцінки якості виконання команд диспетчера.

Для оцінки потенціалу ЕНВ у програмах реагування на попит необхідно створити його точну модель, що враховує фізичні процеси та електротермічні характеристики. Температурний профіль водонагрівача характеризується стратифікацією: гаряча вода накопичується у верхній частині бака, холодна – внизу. Завдяки цьому процеси можна описати одновимірною моделлю з трьома фазами: спокій (теплові втрати та дифузія), нагрівання (локальне змішування шарів) і злив (утворення зони змішування). Такий підхід дозволяє оптимізувати роботу ЕНВ в енергосистемі, забезпечуючи ефективне управління навантаженням. На рис. 2 наведено приклад температурного профілю всередині стратифікованого ЕНВ та 3 фази його роботи разом з основними формулами.

Математична (комп’ютерна) модель ЕНВ розроблена в OpenModelica для аналізу теплових процесів та оптимізації роботи водонагрівача. Вона враховує ключові параметри: температуру води, навколишнього середовища, вхідної води, потужність, об’єм і витрати гарячої води. Після налаштування модель проходить експериментальну перевірку на реальному обладнанні, що підтверджує її точність і можливість застосування для оптимізації роботи ЕНВ у різних умовах експлуатації [1].

Експериментальні результати підтверджують, що запропонована математична модель ЕНВ точно відтворює дані експериментів протягом

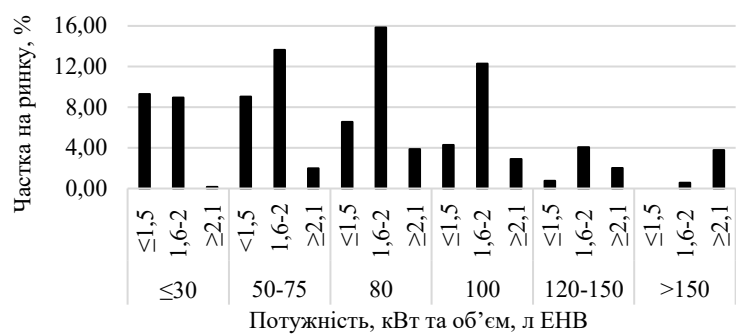


Рисунок 1. Аналіз пропозицій ЕНВ на ринку України

більш ніж 3 днів, що є достатнім для прорахунку торгових стратегій на ринку. Водночас вона забезпечує безперервне моделювання до 45 днів з високою точністю вихідних даних, що робить її ефективним інструментом для довготривалих прогнозів і аналізу ринку.

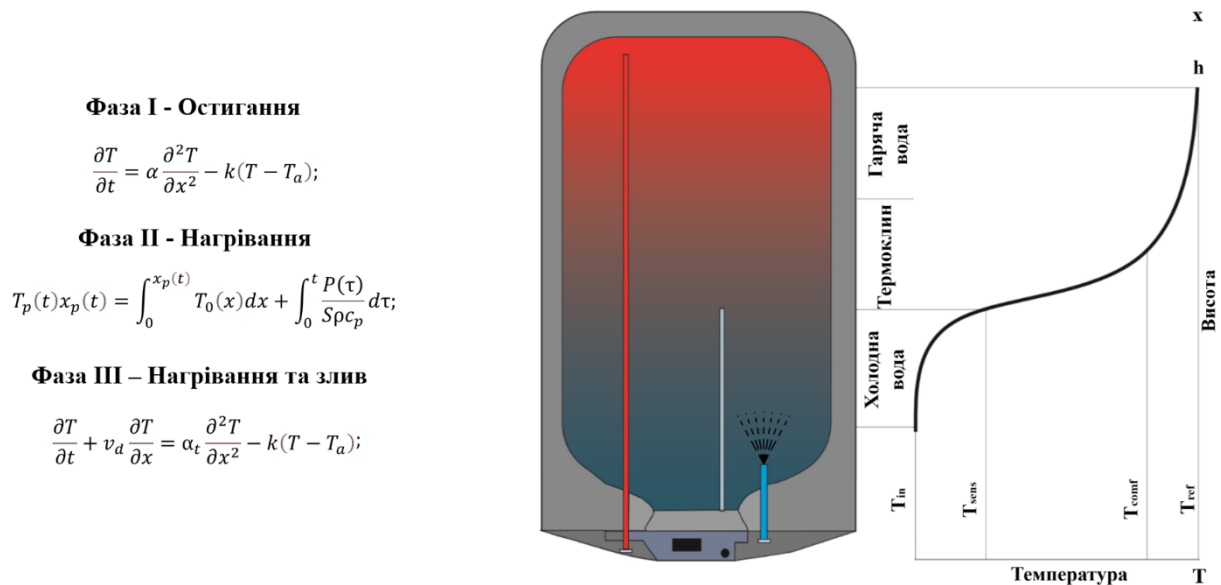


Рисунок 2. Приклад температурного профілю всередині стратифікованого ЕНВ

Сезонні фактори суттєво впливають на споживання електроенергії ЕНВ: взимку через низьку температуру навколишнього середовища та вхідної води енергоспоживання зростає, тоді як влітку воно зменшується через вищу початкову температуру води. Це зумовлює коливання попиту на електроенергію протягом року.

Оптимальне керування гнучкими ресурсами ЕНВ може інтегруватися в ринок електричної енергії через балансуючий ринок та ринок допоміжних послуг. У натурному експерименті з сім'єю, що працює вдома, було досліджено можливість керування ЕНВ потужністю 1,2 кВт та ємністю 80 л за допомогою “розумного” лічильника, розетки та реєстратора температури. Визначено два продукти для на балансуєчому ринку: БР_р_13 (увімкнення з 12:00 до 12:59) і БР_з_23 (вимкнення з 22:00 до 22:59) [1]. Експерименти показані на рис. 3 підтвердили ефективність керування навантаженням у денні години, тоді як вечірнє споживання виявилось менш прогнозованим, але все ж підлягало регулюванню. Це відкриває можливості для створення механізмів балансування споживання електричної енергії через агрегаторів.

Для залучення побутових споживачів до програм керування попитом необхідно створити двоспрямовану комунікаційну інфраструктуру, що забезпечить обмін даними між споживачами та оператором мережі в режимі реального часу. Важливим фактором є також розробка стимулюючих тарифів та економічних механізмів, які мотивуватимуть споживачів брати участь у таких програмах і оптимізувати власне енергоспоживання [3].

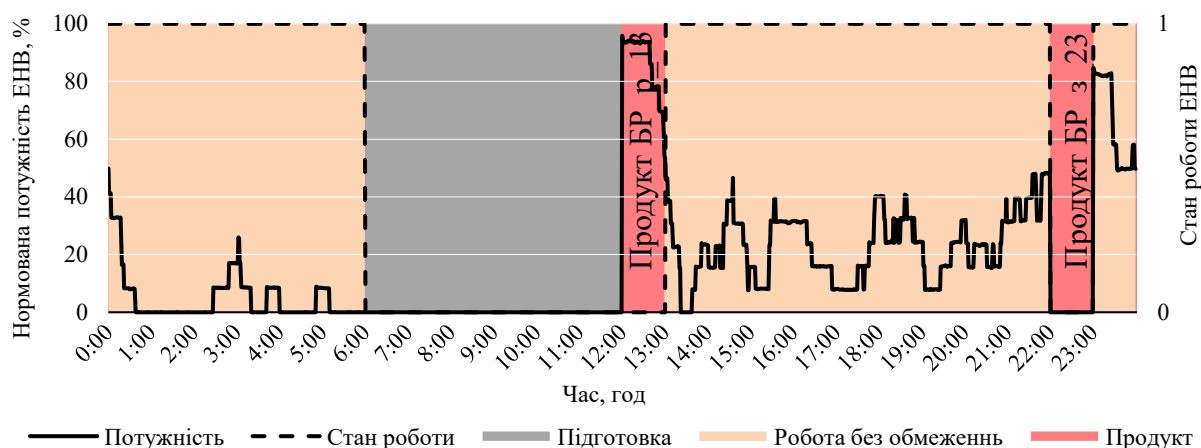


Рисунок 3. Споживання потужності з мережі при реалізації продуктів

Аналіз налаштувань електричних водонагрівачів показав, що баланс між об'ємом бака та температурою нагріву безпосередньо впливає на комфорт споживачів і енергоефективність пристрою. В ході дослідження було розглянуто одинадцять водонагрівачів однакової потужності 2 кВт, але з різним об'ємом від 50 до 100 літрів. Всі вони працювали за однаковим графіком споживання гарячої води, який складав 212 літрів на день при температурі 40 °С. Отримані результати дозволили визначити оптимальні комбінації параметрів, за яких водонагрівач здатен забезпечувати необхідний запас гарячої води. Дослідження показане на рис. 4 підтвердило, що вибір оптимального поєднання об'єму і температури дозволяє забезпечити комфорт та зменшити витрати електроенергії. Водночас, збільшення об'єму бака без зниження температури нагріву призводить до зростання енергоспоживання. Це підкреслює важливість правильного налаштування параметрів роботи водонагрівача для досягнення енергоефективності.

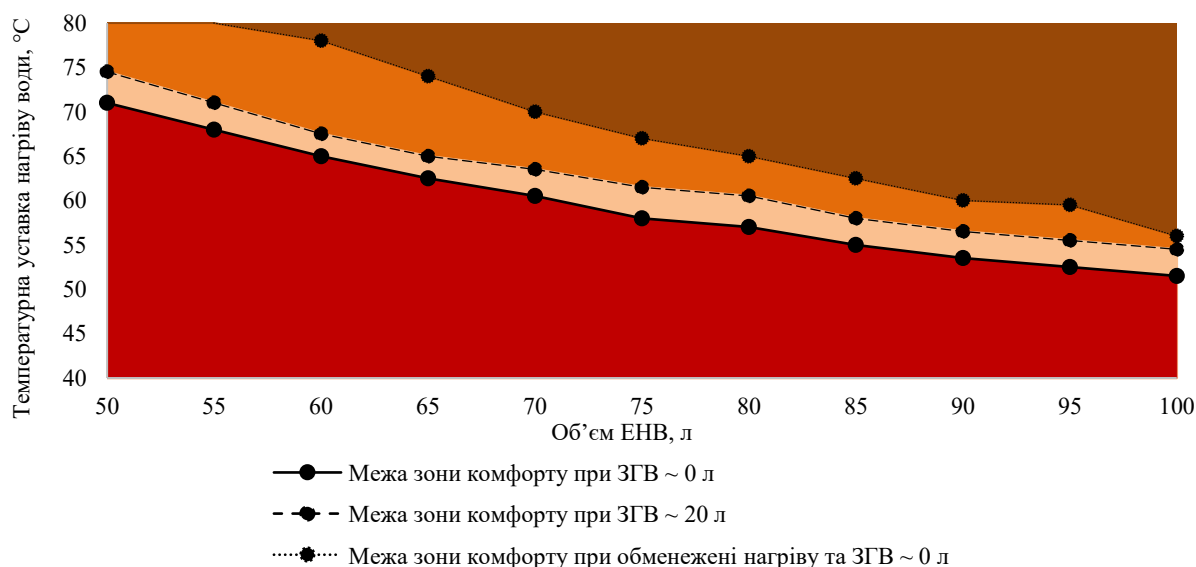


Рисунок 4. Крива оптимальності Парето відповідно до різних ЗГВ

Потенціал електричних водонагрівачів для реагування на попит в Україні є значним. За даними соціально-демографічних характеристик домогосподарств України, опублікованим у статистичному збірнику Держстату України у 2021 році 38,9 % домогосподарств, або близько 5,71 млн сімей, використовували електричні водонагрівачі. Найбільш поширеними є ЕНВ вертикального монтажу. Особливу увагу в аналізі було приділено водонагрівачам з об'ємом 80-100 літрів, які найбільш популярні для побутового використання та мають високий потенціал для гнучкого керування. Розрахунки показали, що їхній загальний ресурсний потенціал у програмах реагування на попит становить приблизно 3186 МВт, що дозволяє створити резерв для балансування.

Розвиток практики реагування на попит відбувається поступово – від великих споживачів до окремих домогосподарств. Ключову роль у цьому процесі відіграють агрегатори, які залучають малих споживачів до ринку електроенергії, спрощуючи для них участь у торгах. Агрегатор забезпечує взаємодію споживачів із ринком, конвертуючи їхню здатність змінювати споживання у комерційні продукти та послуги. Він шукає споживачів із гнучким споживанням, оцінює їхній потенціал, оснащує автоматизованими системами та виступає посередником на оптовому ринку. Крім того, агрегатор об'єднує ресурси багатьох користувачів у єдиний механізм зміни навантаження та несе відповідальність за його ефективне функціонування.

Висновки. Участь побутових споживачів у програми реагування на попит має високий потенціал для зниження пікових навантажень на енергетичну мережу, особливо при інтеграції ЕНВ у систему автоматизованого управління споживанням електроенергії.

Дослідження показало важливість розвитку математичних моделей ЕНВ для аналізу і оптимізації їх роботи, що дає змогу точно моделювати їх енергоспоживання та роботу в різних умовах. Виявлені суттєві впливи сезонних факторів на енергетичні потреби домогосподарств України, де коливання температури навколишнього середовища прямо корелюють із змінами в споживанні електричної енергії для нагрівання води. Результати дослідження підтверджують значний потенціал ЕНВ як ресурсу для реагування на попит в Україні, раціональне управління якими сприятиме підвищенню ефективності енергосистеми, зниженню пікових навантажень та залежності від пікової генерації. Важливим етапом є інтеграція ЕНВ у автоматизовані системи реагування на попит.

Список використаних джерел

1. Кіянчук В. М. Участь побутових споживачів на енергетичних ринках через керування попитом / В. М. Кіянчук, К. В. Махотіло // Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит = Energy saving. Power engineering. Energy audit. – 2023. – № 9–10 (187–188). – С. 6–35. URL: <http://eee.khpi.edu.ua/article/view/298149> (дата звернення 01.03.2025).
2. V. Kiianchuk and K. Makhotilo, “Modeling of Domestic Electric Water Heaters for Demand Response”, 2024 IEEE 5th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek),

Kharkiv, Ukraine, 2024, pp. 1–6, DOI: 10.1109/KhPIWeek61434.2024.10878015. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10878015> (дата звернення 01.03.2025).

3. Kiianchuk V. Analysing household consumers' demand response through behavioural load profiles. Technical Scientific Conference of Undergraduate, Master, PhD students, Technical University of Moldova, Chisinau, 5 April 2023. Chisinau, 2023. pp. 80–83. URL: <http://repository.utm.md/bitstream/handle/5014/23720/Conf-TehStiint-UTM-StudMastDoct-2023-v1-p-80-83.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (дата звернення 01.03.2025).

References

1. Kiyanchuk V. M. Participation of household consumers in energy markets through demand management / V. M. Kiyanchuk, K. V. Makhotilo // Energy Saving. Power Engineering. Energy Audit. – 2023. – No. 9–10 (187–188). – pp. 6–35. URL: <http://eee.khpi.edu.ua/article/view/298149> (accessed 01.03.2025). (Ukr).

2. V. Kiianchuk and K. Makhotilo, “Modeling of Domestic Electric Water Heaters for Demand Response”, 2024 IEEE 5th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), Kharkiv, Ukraine, 2024, pp. 1–6, DOI: 10.1109/KhPIWeek61434.2024.10878015. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10878015> (accessed 01.03.2025).

3. Kiianchuk V. Analysing household consumers' demand response through behavioural load profiles. Technical Scientific Conference of Undergraduate, Master, PhD students, Technical University of Moldova, Chisinau, 5 April 2023. Chisinau, 2023. pp. 80–83. URL: <http://repository.utm.md/bitstream/handle/5014/23720/Conf-TehStiint-UTM-StudMastDoct-2023-v1-p-80-83.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (accessed 01.03.2025).

УДК 621.565.83

Ніцак Я. М., аспірант, ORCID 0009-0006-3869-8231,
науковий керівник: канд. техн. наук, доцентка **А. В. Босак**,
Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

АНАЛІЗ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ГВИНТОВИХ КОМПРЕСОРНИХ УСТАНОВОК НА ОСНОВІ ПОЛОЖЕННЯ ЗОЛОТНИКА

ANALYSIS AND MODELING OF ENERGY CONSUMPTION IN SCREW COMPRESSOR UNITS BASED ON SLIDE VALVE POSITION

Анотація. Промислові холодильні системи є значними споживачами електроенергії, і їх оптимізація є критичною для зниження експлуатаційних витрат та впливу на навколишнє середовище. В даній роботі представлено результати аналізу та математичного моделювання енергоспоживання гвинтових компресорних установок, що використовуються в промислових холодильних системах. Досліджено залежність струму двигуна від положення золотника для двох установок: з компресором без частотного перетворювача (ПЧ) та з компресором, оснащеним ПЧ. З використанням даних, отриманих з реальної промислової установки, розроблено математичні моделі, що дозволяють прогнозувати енергоспоживання компресорів в залежності від положення золотника. Проведено порівняльний аналіз моделей для обох типів компресорів, що дозволило оцінити вплив ПЧ на енергетичні характеристики установки. Отримані результати можуть бути використані для розробки стратегій оптимізації енергоспоживання холодильних систем. Бібл. 3, рис. 1.

Ключові слова: гвинтовий компресор, адаптивне керування, положення золотника, промислова холодильна система, енергоефективність, математичне моделювання, Support Vector Regression, поліноміальна регресія.

Abstract. Industrial refrigeration systems are significant consumers of electricity, and their optimization is critical for reducing operating costs and environmental impact. This paper presents the results of the analysis and mathematical modeling of the energy consumption of screw compressor units used in industrial refrigeration systems. The dependence of the motor current on the spool position was studied for two units: with a compressor without a frequency converter (FC) and with a compressor equipped with a FC. Using data obtained from a real industrial unit, mathematical models were developed that allow predicting the energy consumption of compressors depending on the spool position. A comparative analysis of the models was carried out for both types of compressors, which allowed assessing the impact of the FC on the energy characteristics of the unit. The results obtained can be used to develop strategies for optimizing the energy consumption of refrigeration systems. Ref. 3, Fig. 1.

Key words: screw compressor, adaptive control, spool position, industrial refrigeration system, energy efficiency, mathematical modeling, Support Vector Regression, polynomial regression.

Вступ. Промислові холодильні системи є значними споживачами електроенергії, і їх оптимізація є важливим завданням для зниження експлуатаційних витрат та зменшення впливу на навколишнє середовище [1]. Гвинтові компресори широко використовуються в таких системах, а їх ефективність значною мірою визначається режимом роботи та параметрами керування. Одним з ключових параметрів є положення золотника, яке регулює продуктивність компресора [2]. Дослідження залежності між положенням золотника та енергоспоживанням компресора є важливим для розробки ефективних стратегій керування [3]. В даній роботі проведено аналіз та математичне моделювання енергоспоживання гвинтових компресорних установок з та без частотного перетворювача (ПЧ) на основі даних, отриманих з реальної промислової установки.

Мета і завдання досліджень. Метою даного дослідження є аналіз та математичне моделювання енергоспоживання гвинтових компресорних установок з та без частотного перетворювача (ПЧ) на основі положення золотника. Для досягнення поставленої мети було вирішено наступні завдання:

1. Збір та аналіз даних про положення золотника, струм двигуна, оберти двигуна та температуру всмоктування з реальної промислової холодильної установки.
2. Розробка математичних моделей залежності струму двигуна від положення золотника для компресора без ПЧ та компресора з ПЧ.
3. Порівняльний аналіз отриманих моделей з метою оцінки впливу ПЧ на енергетичні характеристики компресора.
4. Оцінка можливостей використання отриманих моделей для оптимізації енергоспоживання холодильної системи.

Матеріал і результати досліджень. Для дослідження ефективності адаптивного керування гвинтовими компресорними установками використано дані промислової холодильної системи, що включає дві

установки: з компресором без частотного перетворювача (ПЧ) та з компресором, оснащеним ПЧ. Збір даних проводився в період з 21 по 27 квітня 2024 року з дискретністю в одну хвилину. Дані містять інформацію про положення золотника (PrimarySlidePosition), струм двигуна (MotorCurrent), оберти двигуна (MotorSpeed – тільки для компресора з ПЧ) та температуру всмоктування (SuctionTemperature).

З метою встановлення кількісних залежностей між положенням золотника та струмом двигуна, а також для подальшої розробки алгоритму адаптивного керування, було проведено математичне моделювання. Враховуючи відмінності в конструкції та принципах керування компресорами, для кожного з них було застосовано різні методи моделювання.

Компресор без ПЧ: Для моделювання залежності між положенням золотника та струмом двигуна у компресорі без ПЧ було застосовано поліноміальну регресію другого порядку. Цей метод був обраний з огляду на візуально спостережувану нелінійність залежності (рис. 1, а).

Як видно з рис. 1, а, залежність між положенням золотника та струмом двигуна для компресора без ПЧ має характерну криволінійну форму. Спостерігається відносно повільне зростання струму при малих та середніх значеннях положення золотника, з подальшим значним збільшенням струму при досягненні положення золотника значень, близьких до максимальних. Така поведінка може бути пояснена особливостями конструкції гвинтового компресора та зміною його продуктивності в залежності від положення золотника.

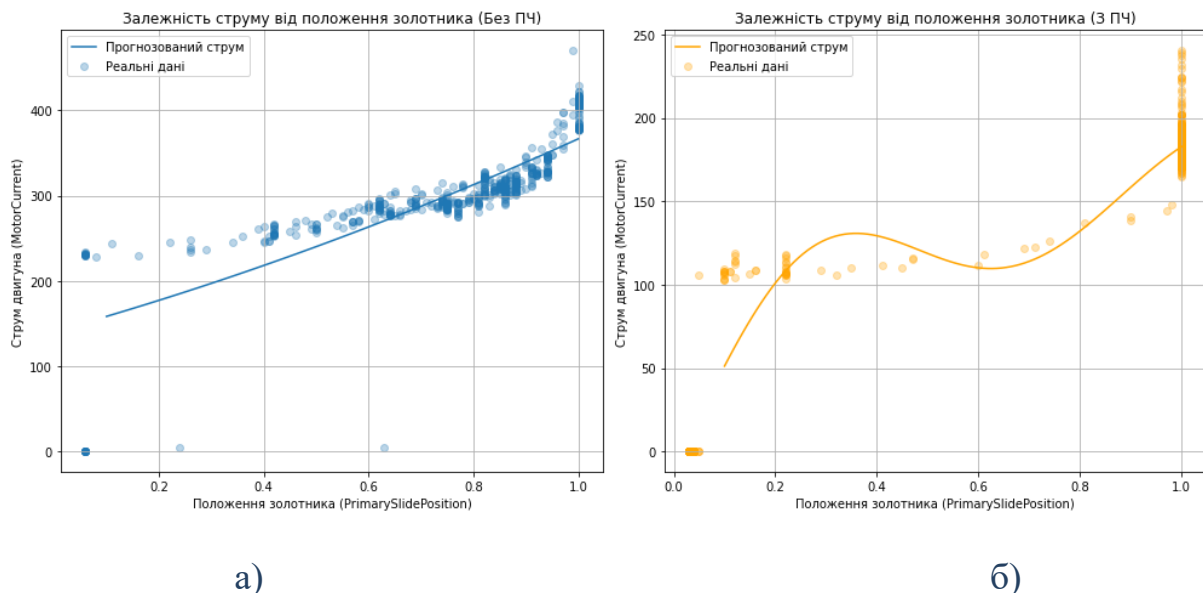


Рисунок 1. Залежність струму двигуна від положення золотника для компресорних установок без ПЧ (а) та з ПЧ (б)

Як видно з рис. 1, а, залежність між положенням золотника та струмом двигуна для компресора без ПЧ має характерну криволінійну форму. Спостерігається відносно повільне зростання струму при малих та середніх

значеннях положення золотника, з подальшим значним збільшенням струму при досягненні положення золотника значень, близьких до максимальних. Така поведінка може бути пояснена особливостями конструкції гвинтового компресора та зміною його продуктивності в залежності від положення золотника.

Отримане рівняння поліноміальної регресії має наступний вигляд:

$$MotorCurrent = \beta_0 + \beta_1 \cdot PrimarySlidePosition + \beta_2 \cdot (PrimarySlidePosition)^2, \quad (1)$$

де β_0 , β_1 та β_2 – оцінені коефіцієнти регресії. Результати моделювання ($MSE = 1499,50$, $R^2 = 0,596$) свідчать про задовільну якість моделі, проте подальше вдосконалення може бути досягнуто за рахунок включення додаткових факторів, таких як температура всмоктування.

Компресор з ПЧ: Для моделювання компресора з ПЧ використано метод Support Vector Regression (SVR) з радіальною базовою функцією (RBF). Цей метод дозволяє врахувати складні нелінійні залежності та є менш чутливим до викидів у даних. Залежність струму двигуна від положення золотника для компресора з ПЧ має інший характер (рис. 1, б). Значна частина даних зосереджена в області малих значень положення золотника та струму, що відповідає режимам роботи з низьким навантаженням. Подальше зростання положення золотника супроводжується більш лінійним збільшенням струму, ніж у компресора без ПЧ. Наявність ПЧ дозволяє більш плавно регулювати продуктивність компресора, що відображається у більш рівномірному розподілі точок на графіку.

В результаті моделювання методом SVR досягнуто наступних показників: $MSE = 0,429$ (в нормованому масштабі), $R^2 = 0,54$. Хоча значення MSE є відносно низьким, значення R^2 свідчить про наявність невикористаного потенціалу для покращення якості моделі.

Висновки. В результаті проведеного дослідження було встановлено кількісні залежності між положенням золотника та струмом двигуна для гвинтових компресорних установок з та без частотного перетворювача (ПЧ). Показано, що залежність між положенням золотника та струмом двигуна має нелінійний характер для обох типів компресорів. Для моделювання компресора без ПЧ ефективним виявилось використання поліноміальної регресії другого порядку, а для компресора з ПЧ – методу Support Vector Regression (SVR). Порівняльний аналіз отриманих моделей та графіків залежності струму двигуна від положення золотника (рис. 1) дозволив візуалізувати вплив ПЧ на енергетичні характеристики компресора. Отримані результати можуть бути використані для розробки стратегій оптимізації енергоспоживання промислових холодильних систем та для вибору оптимального обладнання при модернізації існуючих установок. Подальші дослідження будуть спрямовані на врахування додаткових факторів, що впливають на енергоспоживання компресора (наприклад, температура

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. Ярмолук**,
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].

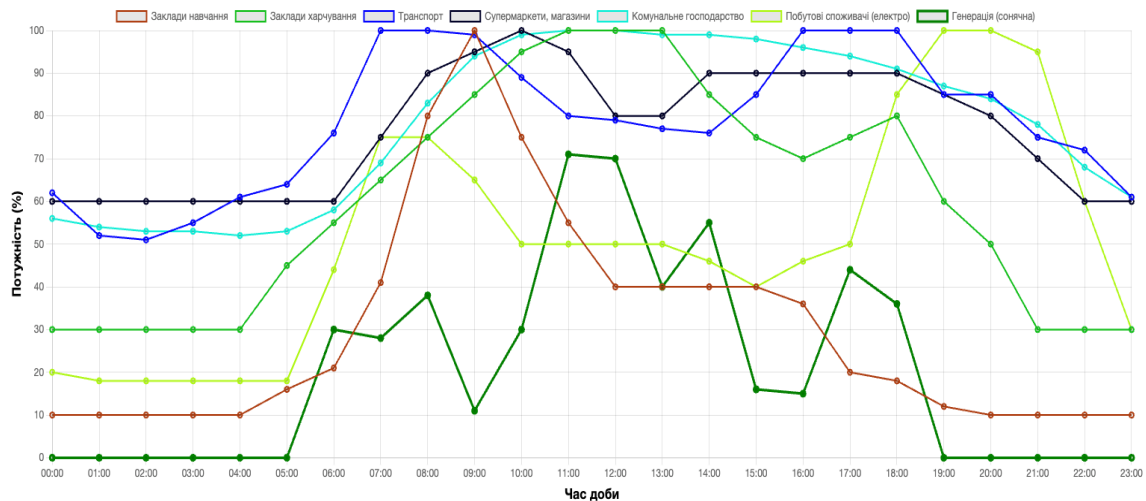


Рисунок 1. Умовний добовий графік навантаження у вузлах розподільної мережі

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.

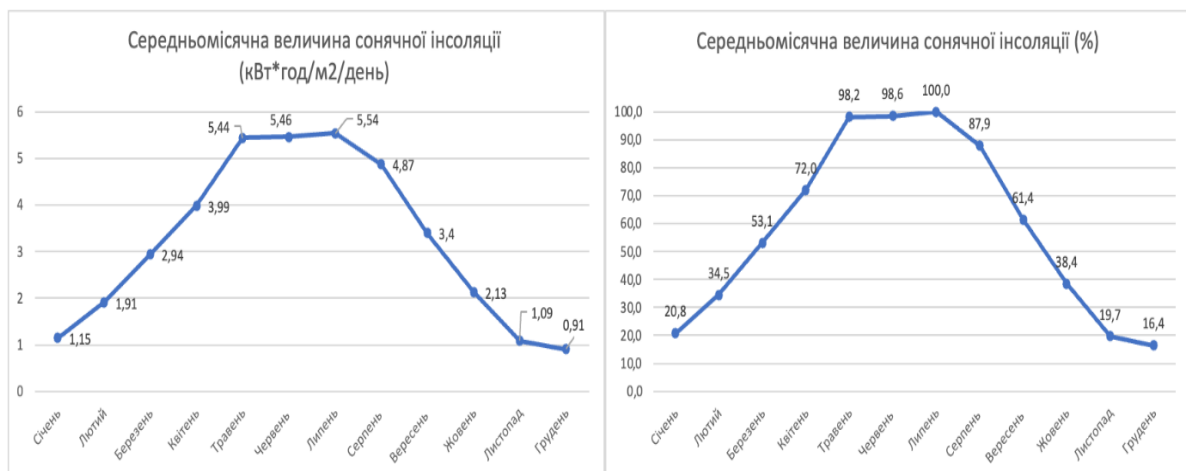


Рисунок 2. Усереднена середньомісячна величина сонячної інсоляції за спостереженнями НАСА за останні 22 роки, кВт*год/м2/день [3]

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

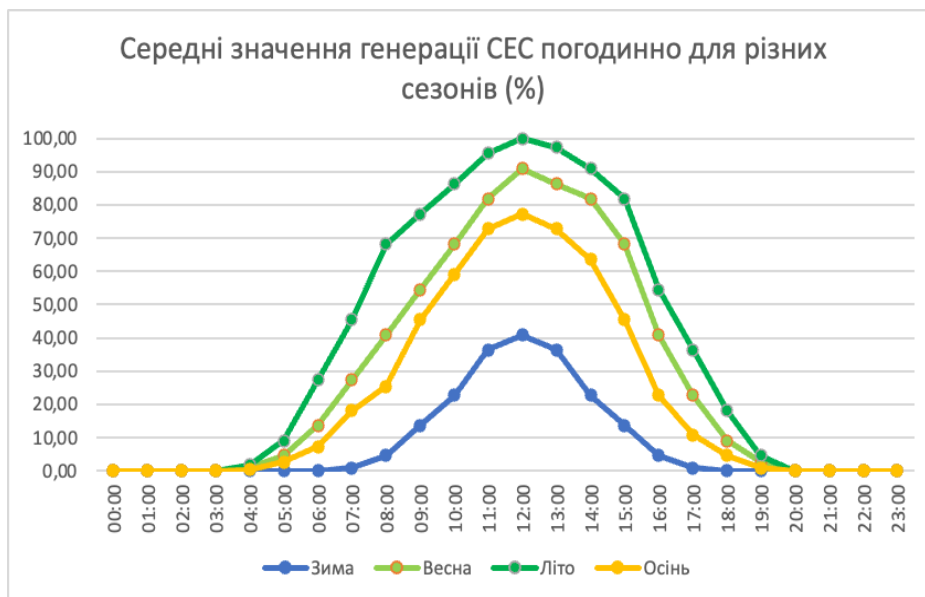


Рисунок 3. Середньодобові погодинні значення генерації СЕС у сезонному розрізі

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:

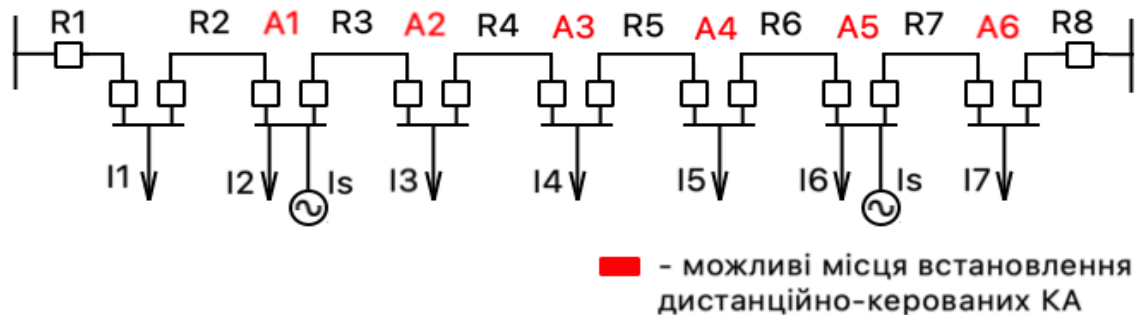


Рисунок 5. Схема розподільної мережі 10 кВ з можливими місцями для встановлення дистанційно-керованих КА

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 інтервалах 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

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 карбіду 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 напрузі (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 відрізнятися 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 $T_c = 25^\circ\text{C}$	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 напрузі 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.

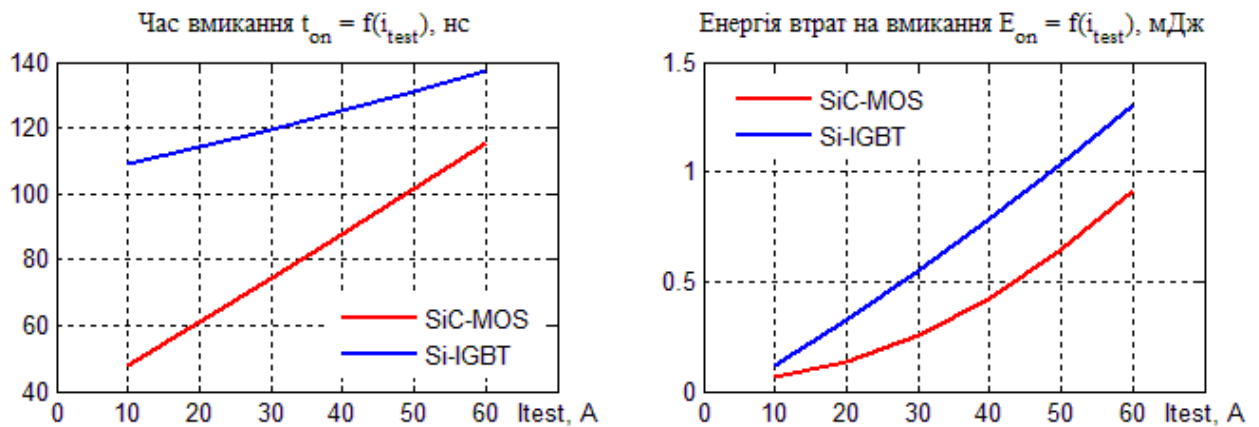


Рисунок 1. Графік залежності часу вмикання та енергії втрат на вмикання від комутованого струму

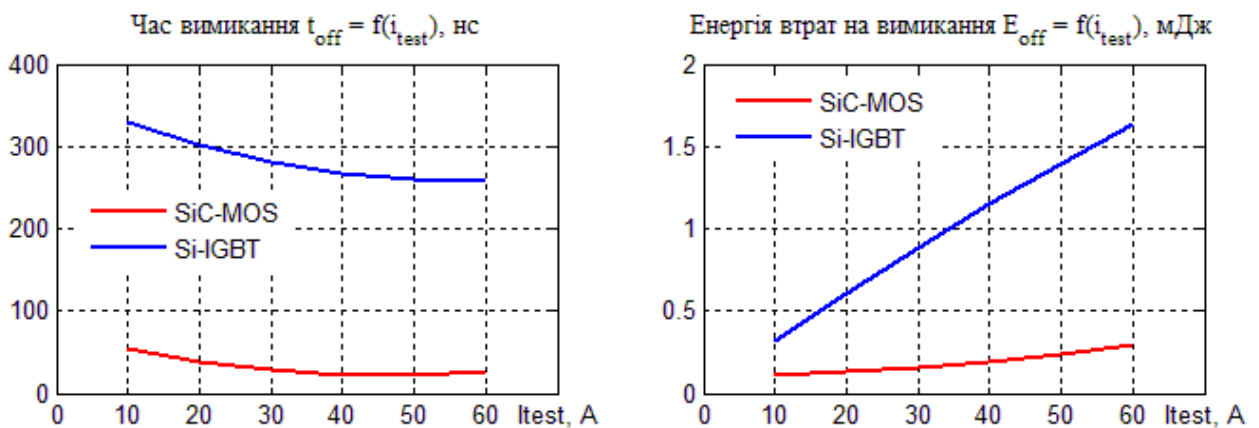


Рисунок 2. Графік залежності часу вимикання та енергії втрат на вимикання від комутованого струму

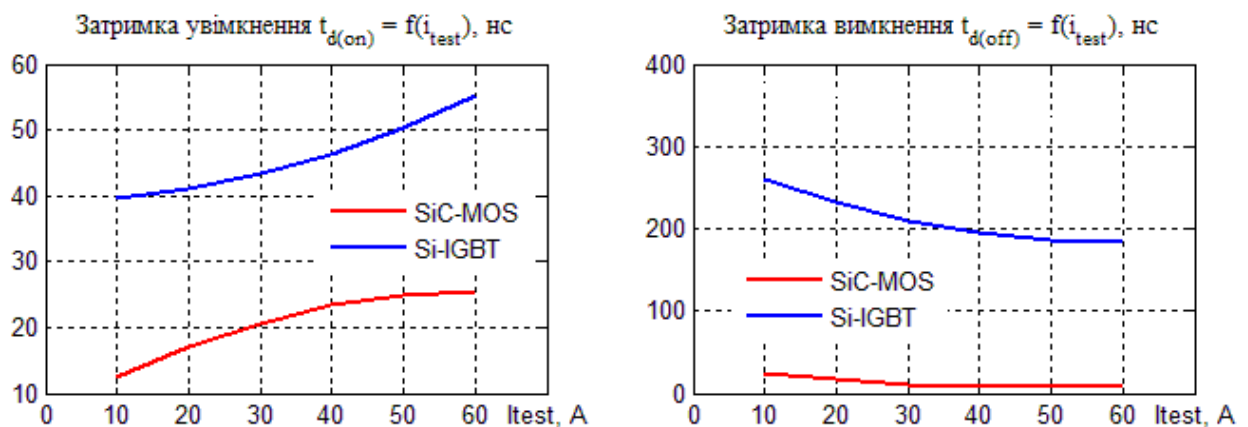


Рисунок 3. Графік залежності затримок вимкнення та увімкнення від комутованого струму

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,

спрямований на зменшення втрат і покращення енергетичної ефективності. Дослідження оцінює вплив вдосконаленої системи керування компенсаційними пристроями. Отримані результати показують перспективність запропонованих рішень по компенсації реактивної потужності. Бібл. 6, рис. 3.

Ключові слова: гірничозбагачувальні комбінати, енергоефективність, конденсаторні батареї, синхронні двигуни, реактивна потужність, активна потужність.

Abstract. The article presents the results of modeling a centralized reactive power compensation system for a mining and processing enterprise. The model is based on advanced principles of energy consumption monitoring and control at substations of mining and processing plants in the development of a cyber-physical system. Daily and annual electricity consumption data have been analyzed. An innovative approach to energy flow monitoring and optimization is proposed, aimed at reducing losses and improving energy efficiency. The study evaluates the impact of the improved control system for compensation devices. The obtained results demonstrate the feasibility of the proposed solutions for reactive power compensation. Ref. 6, Fig. 3.

Keywords: mining and processing plants, energy efficiency, capacitor banks, synchronous motors, reactive power, active power.

Вступ. Енергетична ефективність є ключовим фактором у підвищенні конкурентоспроможності гірничозбагачувальних підприємств (ГЗК), які належать до найбільш енергоємних промислових об'єктів. Зараз наявна ситуація суттєвого обмеження обсягів споживання електричної потужності. Через це знижується завантаженість трансформаторів, асинхронних двигунів, що призводить до збільшення частки реактивної потужності (РП). Додатково можливі відключення “природних” компенсаторів – синхронних двигунів (СД). В такій ситуації виникає необхідність створення багатокритеріальної адаптивної системи обліку та контролю перетіканням реактивної потужності, що базується на інтеграції інформаційних і автоматизованих технологій (тобто розглядати мережу як кіберфізичну систему (КФС)). Така система дозволить оптимізувати розподіл РП в режимі реального часу, зменшити навантаження на мережі та знизити втрати електричної енергії.

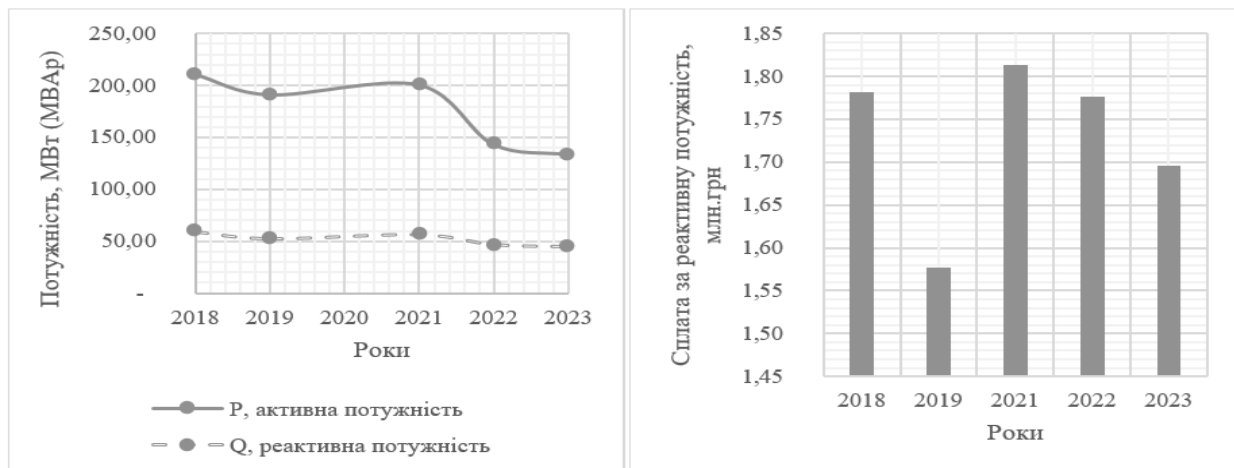
Метою досліджень є удосконалення моделі процесу компенсації реактивної потужності на підприємствах гірничозбагачувального комплексу з урахуванням динаміки енергоспоживання, що дозволить підвищити електроенергетичну ефективність живлячих підстанцій.

Матеріал і результати досліджень. Аналіз проведених досліджень свідчить про перспективність впровадження адаптивних систем керувань перетіканням реактивної потужності [1–3]. Водночас автоматизовані централізовані системи керування перетіканням реактивної потужності в промислових мережах демонструють підвищення енергоефективності на 15–20 % залежно від специфічних умов [2]. Завдяки централізованому управлінню забезпечується більш точне регулювання розподілу реактивної потужності [3].

Аналіз тенденцій у споживанні електроенергії є важливим етапом оцінки енергетичної ефективності підприємства. На рис. 1 наведено динаміку електроспоживання та сплата за спожиту реактивну потужність споживачами ГЗП № 1 гірничозбагачувального підприємства N. Ситуація при наявності

стабільного, або підвищеного співвідношення активної та реактивної потужності створює значні виклики для управління енергетичними ресурсами, оскільки підвищене реактивне навантаження негативно впливає на ефективність експлуатації трансформаторів і електродвигунів, які часто працюють у недовантаженому режимі.

Крім того, підприємство несе додаткові фінансові витрати не лише за фактично спожиту реактивну потужність, а й за її недокомпенсацію. Аналіз представлених графіків свідчить про суттєве скорочення обсягів електроспоживання в останні роки. Зокрема, у 2022 році зафіксовано найбільше зниження – на 28,5 % для активної та на 17,44 % для реактивної потужності споживачів ГЗП № 1. Однак, з огляду на зростання тарифів, загальні витрати на оплату реактивної потужності зменшилися лише на 2 %, що підкреслює необхідність удосконалення системи компенсації для підвищення економічної ефективності енергоспоживання.



а)

б)

Рисунок 1. Статистичні дані по ГЗП № 1 за різні роки: а) – споживання електричної енергії споживачами ГЗП за 2018–2023 рр.; б) – плата за реактивну потужність за 2018–2023 рр.

Електричні мережі промислових підприємств є досить складними структурами з великою кількістю споживачів з різкозмінним характером навантаження. В свою чергу, самі підстанції є також складовими ще більшої енергетичної системи. Врахування усіх складових у такому випадку буде дуже складним та нераціональним по відношенню до затрачуваних розрахункових потужностей. Тому доцільним для подальшого моделювання буде розглянути окрему структуру розподільної підстанції (РП), як частину енергетичної системи підприємства. Кіберфізичні системи (КФС) поєднують комп'ютерні алгоритми з фізичними процесами, забезпечуючи моніторинг, управління, аналіз і оптимізацію роботи електрообладнання.

Для керування компенсаційними пристроями пропонується адаптивний алгоритм. Рівень генерації реактивної потужності конденсаторними батареями регулюється дискретно. У випадку наявності синхронних двигунів

в активі підприємства, оцінюється доцільність їх використання у процесі компенсації реактивної потужності. Для цього централізована система моніторить технологічні показники СД (їх число, температуру охолоджуючого повітря, температуру обмоток статора та побічно ротора, живлячу напругу) з метою не перевищення допустимих значення цих параметрів [4].

Врахувавши особливості запропонованої КФС, було створено модель у середовищі Simulink програмного забезпечення Matlab (версія 2017a). Цю модель наведено на рис. 2. Така структура повністю відповідає загальноприйнятій в цей час концепції автоматизації промислових виробництв та відомим актуальним стандартам [5]. Таким чином, на основі виконаного аналізу можливо створити модель та дослідити енергоефективність запропонованої системи.

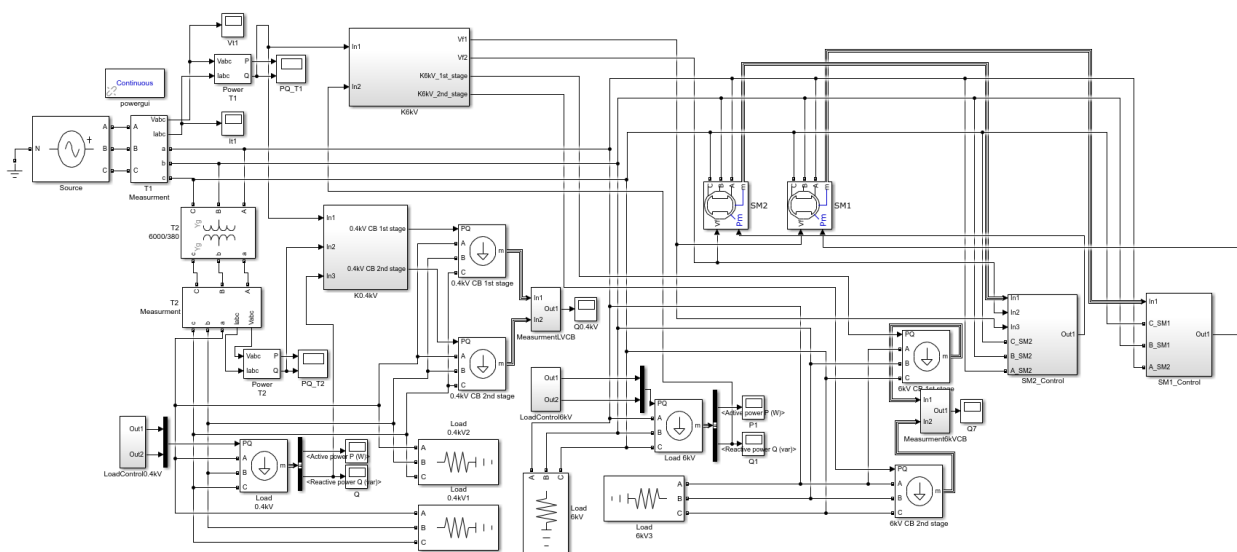


Рисунок 2. Модель адаптивної системи керування компенсаційними пристроями у Simulink

На рис. 3а), б) наведено графіки споживання електричної енергії при наявності та відсутності пристроїв компенсації (пунктиром показана активна потужність, суцільною лінією – реактивна потужність). Дані взято з лічильника на вході.

Як можна побачити на рис. 3 б), адаптивна система керування компенсаційними пристроями ефективно знижує споживання реактивної потужності. Проте повністю забезпечити “нуль-перетікання” майже неможливо, оскільки в даній моделі, як і в реальних електроенергетичних системах підприємств, наявні потужні СД 6 кВ та КБ 0,4 кВ та 6 кВ, що викликають тривалі перехідні процеси. Їх параметри впливають на ефективність компенсації реактивної потужності та на стабільність роботи мережі [6]. В реальних системах додатково буде впливати й характеристики комутаційної апаратури (час перемикавання, опір, тощо). Таким чином, аналіз

перехідних процесів у таких системах є перспективним для подальших досліджень.

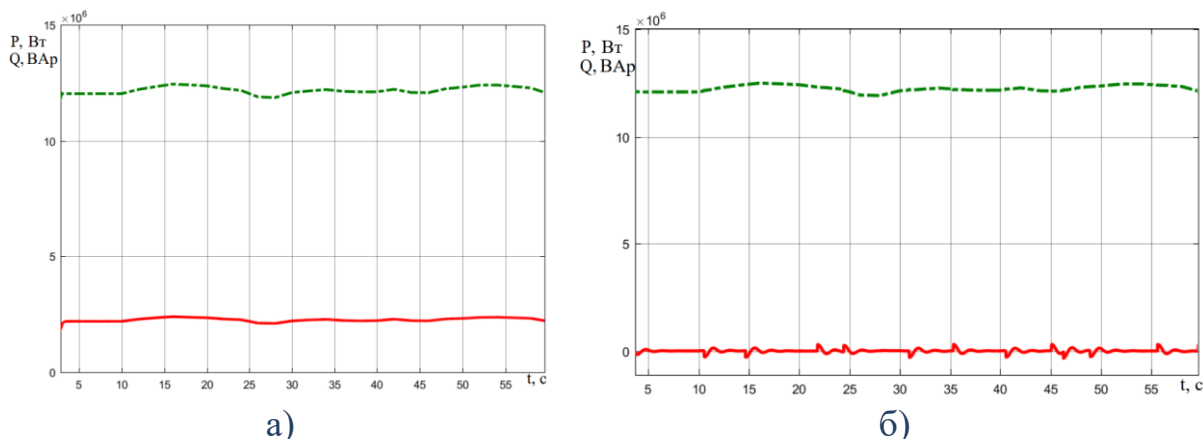


Рисунок 3. Графіки споживання електричної енергії при наявності та відсутності пристроїв компенсації: а) – Споживання електричної енергії без компенсації; б) – Споживання електричної енергії з адаптивною системою обліку та контролю перетіканням реактивної потужності

Додатково при залученні у компенсацію СД та КУ спостерігається відносно незначне підвищення споживання активної потужності (приблизно 0,34 %). Проте в такому випадку додаткова сплата за активну потужність буде приблизно в 3,7 рази менша, ніж за РП до впровадження заходів з компенсації.

Висновки. В результаті дослідження встановлено, що адаптивна система обліку та керування реактивною потужністю на основі адаптивних систем дозволяє раціонально використовувати компенсуючі пристрої. При цьому КБ та СД використовуються раціонально, в залежності від їх технологічних параметрів та необхідного значення РП для компенсації. У результаті система забезпечує максимально приближене до нульового значення споживання РП з мережі, значно знижуючи сплату підприємством за електричну енергію. Таким чином, інтеграція адаптивної системи керування з іншими елементами енергетичного менеджменту підприємства дозволяє не лише знижувати втрати, а й оптимізувати загальну електроенергетичну структуру, підвищуючи стабільність та надійність електропостачання.

Список використаних джерел

1. Salim Adolfo G. Y., Vladimir S. S., Kelly B. S., John E. Candelo-Becerra, Jorge de la Cruz Comprasion of Reactive Power Compensation Methods in an Industrial Electrical System with Power Quality Problems // *Electricity*, 2024. vol. 5, issue 3. pp. 642–661. DOI: 10.3390/electricity5030032.
2. Lionginas L. The methods of reactive power compensation in the 25kV, 50Hz contact network // *Transport Problems*, 2018. vol. 13, issue 5. pp. 59–68. DOI: 10.21307/tp.2018.13.1.6.

3. Alireza A., Hossein H. An improved centralized/decentralized accurate reactive power sharing method in AC microgrids // International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023. vol. 148. 108908. DOI: 10.1016/j.ijepes.2022.108908.
4. Осадчук Ю. Г., Учитель А. Д., Жуков С. А. та ін. Підвищення енергетичної ефективності потужних електроприводів турбомеханізмів гірничо-металургійних комплексів. Монографія. – Кривий Ріг: Редакційно-видавничий центр ГВУЗ “КНУ”, 2018. – 345 с. ISBN 978-966-132-050-4.
5. ДСТУ EN 62264-1:2019. Інтегрування систем керування підприємством та виробництвом. Частина 1. Моделі та термінологія. [Чинний від 2019-09-01]. Вид. офіц. Київ: ДП “УкрНДНЦ”, 2019. 77 с.
6. Mohammed B., Samer S., Yuting T., Joydeep M. Reactive power compensation for reliability improvement of power systems. 2016 DOI: 10.1109/TDC.2016.7519910.

References

1. Salim Adolfo G. Y., Vladimir S. S., Kelly B. S., John E. Candelo-Becerra, Jorge de la Cruz Comparison of Reactive Power Compensation Methods in an Industrial Electrical System with Power Quality Problems // Electricity, 2024. vol. 5, issue 3. pp. 642–661. DOI: 10.3390/electricity5030032.
2. Lionginas L. The methods of reactive power compensation in the 25kV, 50Hz contact network // Transport Problems, 2018. vol. 13, issue 5. pp. 59–68. DOI: 10.21307/tp.2018.13.1.6.
3. Alireza A., Hossein H. An improved centralized/decentralized accurate reactive power sharing method in AC microgrids // International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023. vol. 148. 108908. DOI: 10.1016/j.ijepes.2022.108908.
4. Osadchuk Y. G., Uchitel A. D., Zhukov S. A. et al. Increasing the energy efficiency of powerful electric drives of turbomechanisms of mining and metallurgical complexes. Monograph. – Kryvyi Rih: Editorial and Publishing Center of the State University of Mining and Metallurgy “KNU”, 2018. – 345 p. ISBN 978-966-132-050-4. (Ukr).
5. DSTU EN 62264-1:2019. Integration of enterprise and production management systems. Part 1. Models and terminology. [Valid from 2019-09-01]. Official edition. Kyiv: State Enterprise "UkrNDNC", 2019. 77 p. (Ukr).
6. Mohammed B., Samer S., Yuting T., Joydeep M. Reactive power compensation for reliability improvement of power systems. 2016 DOI: 10.1109/TDC.2016.7519910.

УДК 621.317.318

Довгий С. С., аспірант, ORCID 0009-0003-9428-7240,
науковий керівник: канд. техн. наук, доцент **О. В. Коцар**,
Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

ПІДВИЩЕННЯ ДОСТОВІРНОСТІ ЕНЕРГОМОНІТОРИНГУ МСП ЧЕРЕЗ БЕНЧМАРКІНГ

IMPROVING THE CREDIBILITY OF SME ENERGY MONITORING VIA BENCHMARKING

***Анотація.** Переважна більшість МСП беруть участь у програмах підвищення рівня енергетичної ефективності задля посилення конкурентоспроможності на ринку в першу чергу за рахунок розширення виробничих потужностей, а не підвищення*

енергоефективності існуючого обладнання через зменшення невиробничих втрат. Тому ці програми майже не впливають на реальну декарбонізацію і досягнення МСП цільового показника щорічного скорочення споживання енергії. Задля подолання прогалин в статті досліджено доцільність та необхідну періодичність енергомоніторингу, а також розглянуто шляхи підвищення його достовірності. Бібл. 11, рис. 1, табл. 2.

Ключові слова: бенчмаркінг, декарбонізація, електроенергія, енергетична ефективність, енергетичний менеджмент, енергоаудит, енергомоніторинг, МСП.

Abstract. The vast majority of SMEs participate in energy efficiency programmes to improve their competitiveness in the market, primarily by expanding production capacity, rather than by improving the energy efficiency of existing equipment by reducing non-productive losses. Therefore, these programmes have little or no impact on the actual decarbonisation and the achievement of SMEs target annual energy consumption reduction. To address these gaps, the article examines the feasibility and required frequency of energy monitoring and considers ways to improve its credibility. Ref. 11, Fig. 1, Tabl. 2.

Keywords: benchmarking, decarbonisation, electricity, energy efficiency, energy management, energy audit, energy monitoring, SMEs.

Вступ. Задля забезпечення сталого підвищення енергоефективності кінцевого споживання енергії в статті 9 Закону України “Про енергетичну ефективність” [1] встановлено цільовий показник щорічного скорочення споживання енергії на рівні не менше ніж 0,8 відсотки сукупного річного обсягу постачання енергії споживачам. Досягнення такого показника передбачається шляхом вжиття організаційно-економічних та правових заходів із стимулювання енергоефективності, а також завдяки діяльності відповідних фондів.

Окрім цього, з метою підтримки ініціатив щодо енергоефективності, проведення енергетичних аудитів і підтримки здійснення енергоефективних заходів суб’єктами малого та середнього підприємництва (МСП) Закон [1] передбачає впровадження цільових економічних програм енергоефективності. На сьогодні суттєва частина таких програм реалізується за кошти міжнародних донорів. При цьому до МСП висуваються певні вимоги для участі. Так, серед іншого, енергоефективні заходи, що реалізуються в рамках зазначених програм, мають призвести до певного зменшення енергоспоживання або скорочення викидів парникових газів відносно базового рівня. Необхідний обсяг скорочення енергоспоживання або викидів може різнитися залежно від конкретної програми, проте зазвичай складає щонайменше 20 %.

Оскільки в МСП організаційні енергозберігаючі заходи як і впровадження системи енергетичного менеджменту (СЕНМ) призводять здебільшого до економії, меншої за необхідні 20 %, подібні програми спрямовані на фінансування виключно інвестиційних енергоефективних заходів, пов’язаних в першу чергу з придбанням основних засобів.

З метою аналізу результатів діяльності міжнародних програм енергоефективності розглянуто одну з найбільш дієвих і популярних ініціатив для МСП – “EU4Business” [2]. В рамках цієї ініціативи в Україні з 2018 року функціонує низка програм,

створених Європейським банком реконструкції та розвитку (ЄБРР) у співпраці з Європейським Союзом (ЄС) з метою сприяння фінансуванню інвестицій у МСП для підтримки сталих інвестицій у технології, що відповідають найкращим стандартам у сфері якості продукції, охорони здоров'я та безпеки праці, захисту навколишнього середовища, а також сприяння використанню “зелених” технологій.

Наразі до реалізації цих програм доєдналися 11 найбільших українських банків, які забезпечили фінансування понад 3000 енергоефективних заходів на загальну суму, що перевищує еквівалент 310 млн Євро.

В річних звітах зазначених програм енергоефективності МСП для опису позитивного ефекту на довкілля використовуються терміни “*Energy use avoided*” та “*Greenhouse gas emissions avoided*”, котрі означають уникнення певної кількості спожитої енергії або викидів парникових газів. Ці терміни є надто широко трактованими і охоплюють як реальне зменшення енергоспоживання/викидів при прямій заміні існуючого обладнання на нове, з виводом старого з експлуатації, так і недопущення зайвого збільшення енергоспоживання/викидів при придбанні нового обладнання, яке є енергоефективнішим за аналоги.

Аналіз портфелів цих програм показує, що переважна більшість реалізованих енергоефективних заходів (понад 90 %) пов'язана не з заміною існуючого обладнання підприємств на енергоефективніше, а з придбанням нового. Ба більше, вимоги до виводу з експлуатації або утилізації старого обладнання в цих програмах відсутні.

При цьому зменшення енергоспоживання або скорочення викидів парникових газів під час впровадження таких заходів обґрунтовується тим, що профінансоване нове обладнання щонайменш на 20 % є енергоефективнішим за аналогічне, представлене на українському ринку. Або ж робиться порівняння з базовою лінією по галузі, тобто з найбільш розповсюдженими моделями старого зразка.

Іншими словами, вибір нового обладнання для МСП звужується до найбільш енергоефективних моделей нового обладнання. Однак, при такому сценарії, енергоспоживання МСП в абсолютних показниках неодмінно збільшується, а позитивний ефект полягає у недопущенні понаднормових втрат енергії, тобто задекларована економія виявляється “віртуальною”.

Таким чином, МСП приймають участь у програмах енергоефективності ЄБРР та ЄС з метою максимізації прибутку, а не мінімізації витрат [3]. Тому ці програми майже не впливають на реальну декарбонізацію [4] і досягнення МСП цільового показника щорічного скорочення споживання енергії відповідно до статті 9 Закону [1].

Метою досліджень є оцінка доцільності та необхідної періодичності індивідуального контролю енергоспоживання (енергомоніторингу) МСП, а також пошук шляхів підвищення його достовірності задля скорочення витрат на оплату енергоресурсів і реального зменшення викидів парникових газів.

Для досягнення поставленої мети проведено енергоаудити двох схожих за форматом супермаркетів, розташованих у київських в торговельних центрах (ТЦ), виконано порівняльний аналіз їх споживання електроенергії і проведено бенчмаркінг їх енергетичної ефективності [5].

Матеріал і результати досліджень. Питання організації бенчмаркінгу енергоефективності досліджувало багато науковців, зокрема, КПІ ім. Ігоря Сікорського: В. П. Розен, Б. Л. Тишевич [6, 7] та ін.

В якості об'єктів досліджень було обрано два супермаркети, які орендують частину площ ТЦ в розмірі 9991 м² і 8708 м² та працюють кожен день з 08:00 по 23:00. За результатами натурних обстежень було встановлено, що енергоспоживальне обладнання в обох супермаркетах майже ідентичне і використовується в схожих режимах. Загальна кількість струмоприймачів в супермаркеті 1 складає 2981 одиниць, а в супермаркеті 2 – 2920 одиниць.

Враховуючи різницю в площах супермаркетів, порівняння споживання електроенергії проведено не в абсолютних, а в питомих величинах (приведених до 1 м² займаної площі) за формулою:

$$\Delta_{\text{нм}} = \frac{\left| \frac{\Sigma W_1}{S_1} - \frac{\Sigma W_2}{S_2} \right|}{\frac{\Sigma W_2}{S_2}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

де ΣW – річне споживання активної електроенергії, кВт·год/рік; S – площа, м².

Таким чином визначено, що споживання електроенергії супермаркетом 1 по відомостям, наданим ТЦ, перевищує споживання електроенергії супермаркетом 2 на 55 %. Ця розбіжність є надзвичайно великою, навіть враховуючи незначну різницю в обладнанні супермаркетів і режимів його використання. Для більшої наочності на рис. 1 наведено порівняння питомого місячного споживання електроенергії супермаркетів в межах одного календарного року.

Для визначення розрахункового споживання електроенергії кожного супермаркету виконано паспортизацію електроспоживального обладнання з зазначенням встановленої потужності, графіку роботи та режиму використання і проведено відповідні розрахунки [8] за формулою:

$$W_{\text{розрах}} = P_{\text{вст}} \cdot T_{\text{м}} \cdot K_{\text{вик}}, \quad (2)$$

де $P_{\text{вст}}$ – встановлена (паспортна, номінальна) електрична потужність обладнання, кВт;
 $T_{\text{м}}$ – час роботи обладнання протягом розрахункового місяця, год/місяць; $K_{\text{вик}}$ – коефіцієнт використання встановленої електричної потужності, прийнятий за нормативами для конкретного обладнання або розрахований як

відношення середньої активної потужності обладнання до його номінального значення.

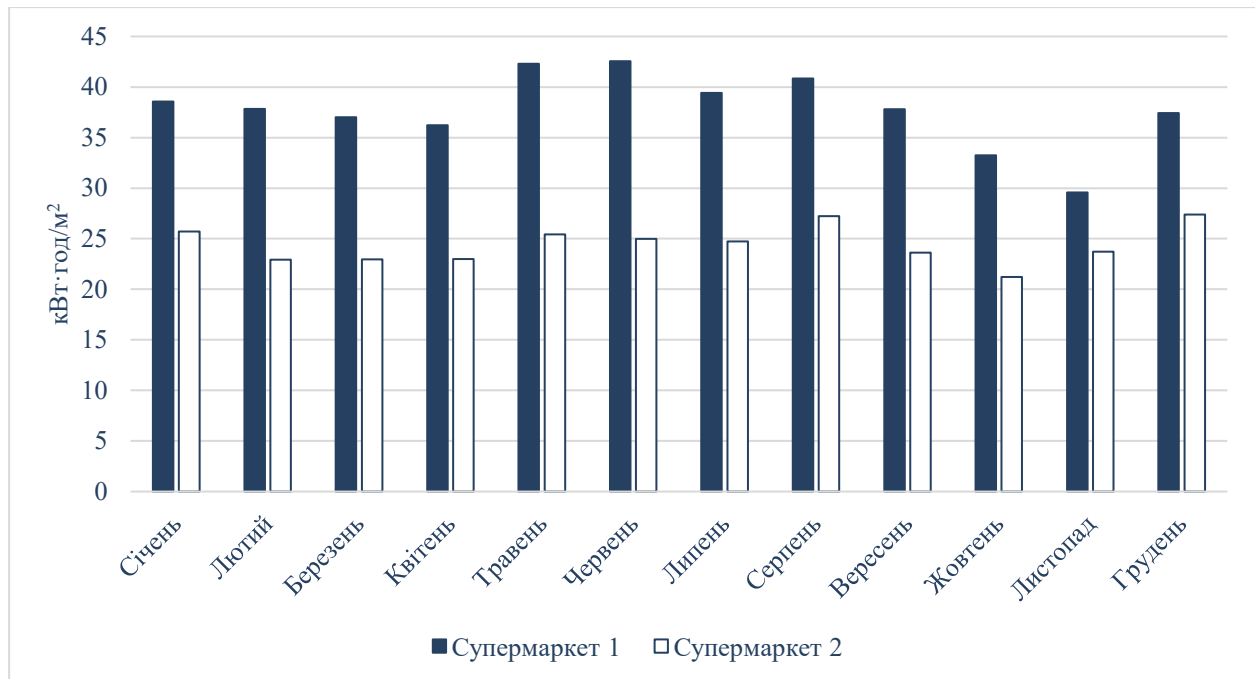


Рисунок 1. Питоме місячне споживання електроенергії супермаркетами

Окрім цього, виконано диференційовані вимірювання споживаної електричної потужності за розподільними щитами (силовим, освітлення, вентиляції) й окремо за найбільш енергоємними споживачами (компресори холодильних і морозильних централей, печі, пароконвектомати, плити, розстоєчні шафи) та їх групам (рибний цех, м'ясний цех, кулінарія, пекарня) з урахуванням вимог [9]. Отримані таким чином дані наведені в табл. 1.

Таблиця 1. Відхилення розрахункового від фактичного споживання електроенергії

Супермаркет	Площа, м ²	Споживання електроенергії, кВт·год/місяць		Відхилення, %
		Розрахункове	Фактичне за останні 3 місяці	
1	9991	233 515	378 628 332 286 295 621	27...62
2	8708	195 813	205 684 184 689 206 562	5...6

Відхилення розрахункового від фактичного місячного споживання електроенергії супермаркетів розраховано за формулою:

$$\Delta_{абс} = \frac{|W_{факт} - W_{розн}|}{W_{розн}} \cdot 100\%, \quad (3)$$

де $W_{\text{факт}}$ і $W_{\text{розрах}}$ – відповідно фактичне і розрахункове місячне споживання активної електроенергії, кВт·год/місяць.

Враховуючи значне відхилення розрахункового від фактичного споживання електроенергії зроблено припущення про некоректність обліку в супермаркеті 1. З метою підтвердження цієї гіпотези проведено детальний аналіз розрахунків за спожиту електроенергію.

В результаті встановлено, що обидва супермаркети не мають прямих договорів з електропостачальними компаніями, як і власних комерційних вузлів обліку. Замість цього облік організовано за рахунок технічних вузлів, влаштованих на електричних вводах: 36 у супермаркеті 1 та 13 у супермаркеті 2.

Наприкінці кожного місяця представники ТЦ і супермаркету утворюють спільні комісії і разом зчитують покази всіх лічильників, на підставі чого складається відомість місячного споживання електроенергії супермаркетом. За цими даними обліку та чинними тарифами виставляється рахунок за компенсацію спожитої супермаркетом електроенергії.

Аналіз архівних даних місячного споживання електроенергії окремо по кожному з лічильників технічного обліку упродовж двох минулих років не виявив аномалій: споживання або коливалось в межах 10 %, або чітко прослідковувалась кореляція з сезонністю.

Проблему виявлено лише після натурального обстеження всіх вузлів технічного обліку супермаркету 1. З'ясовано, що до споживання активної електроенергії додається споживання реактивної електроенергії по двом індукційним лічильникам. Це є неприпустимим, оскільки щомісячне споживання активної електроенергії виявляється завищеним на 50–80 тис. кВт·год від реального значення.

Більш того, в рахунках на компенсацію електроспоживання, які виставляє ТЦ, сума активної та реактивної електроенергії множиться на тариф активної електроенергії, який є набагато вищим за тариф реактивної енергії, що призвело до значних переplat протягом більш ніж двох років.

Усунувши виявлені таким чином невідповідності вдалося заощадити суттєву кількість грошових ресурсів і перерахувати фактичне питоме електроспоживання супермаркетом 1, яке знизилось з 37,7 до 27,7 кВт·год/м² на місяць. Незважаючи на це, перераховане значення питомого електроспоживання перевищувало аналогічний показник для супермаркету 2 на 14 %.

Для подальшого проведення внутрішніх бенчмаркінгових досліджень [5] виконано порівняння електроспоживання однотипних споживачів (та їх груп) обох супермаркетів (табл. 2). В результаті найбільші розбіжності виявлено по системах холодопостачання.

Таблиця 2. Розрахункове електроспоживання по групам однотипних споживачів

Група споживачів	Споживання електроенергії, кВт·год/місяць	
	Супермаркет 1	Супермаркет 2
Опалення, вентиляція і кондиціонування	36 543	39 874
Освітлення (штучне)	39 773	35 321
Офісне обладнання, оргтехніка	11 661	11 505
Технологічне обладнання	37 164	35 904
Холодильне обладнання	108 373	73 208
Разом	233 515	195 813

Дійсно, натурне обстеження супермаркету 1 показало підвищені втрати через суттєві пошкодження теплоізоляції фреонових проводів, обмерзання компресорів, а також роботу холодильної централі з неоптимальними параметрами температури випаровування і конденсації холодоагенту [10].

Запропоновано використати частину заощаджених коштів для впровадження заходів з підвищення енергоефективності системи холодопостачання супермаркету 1, які дозволять досягти показника питомого електроспоживання в розмірі 25,2 кВт·год/м² на місяць, що відрізняється від аналогічного показника супермаркету 2 лише на 3 %. При цьому заплановане зменшення споживання електроенергії становить 300 тис. кВт·год/рік, а скорочення викидів парникових газів – 126 т/рік.

У підсумку варто зазначити, що пошук перевитрат електроенергії на підприємстві було виконано несвоєчасно, зайняло багато часу і вимагало залучення сторонніх енергоаудиторів.

Висновки. Відсутність індивідуального контролю енергоспоживання (енергомоніторингу) на підприємствах може призвести до значних перевитрат, які важко піддаються контролю.

Окрім цього, в МСП гостро відчуються проблеми, пов'язані з недостатньою кількістю інженерного персоналу. Як результат, кількість часу, яку працівники можуть присвятити енергомоніторингу, замала для його якісного виконання, а отже і його періодичність зазвичай є незадовільною.

Більш того, простий аналіз енергоспоживання у порівнянні з попередніми періодами може вказати лише на випадкові відхилення. В той час, як для виявлення систематичних відхилень необхідно застосовувати бенчмаркінг (як внутрішній [11], так і зовнішній) або розраховувати і обґрунтовувати цільове енергоспоживання. Застосування таких методів здатне відчутно підвищити достовірність енергомоніторингу.

Збирання, аналіз та інтерпретація даних енергоспоживання в автоматичному режимі з достатньою періодичністю і застосуванням інструментів підвищення їх достовірності, а також розробка сценаріїв ухвалення та втілення управлінських рішень при відхиленні енергоспоживання за межі очікуваних рівнів, вирішить зазначені проблеми та призведе до мінімізації витрат і декарбонізації МСП.

Список використаних джерел

1. Закон України “Про енергетичну ефективність”. Редакція від 18.09.2024. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1818-20> (дата звернення 03.03.2025).
2. EU4Business: річний звіт 2024. URL: <https://eu4business.org.ua/reports/eu4business-annual-report-2024/> (дата звернення 03.03.2025).
3. Дерій В. Поняття і значення економічного контролю для мінімізації витрат та максимізації доходів підприємств / В. Дерій // Бухгалтерський облік і аудит. – 2011. – № 2. – С. 48–56. – URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/boau_2011_2_7 (дата звернення 03.03.2025).
4. Mazhar M. U., Domingues A. R., Bull R. and O’Boyle S., 2022. Small and medium-sized enterprises: hard to reach, data-poor but rich in creative potential as agents of change for decarbonisation. In: European Council for an Energy Efficient Economy (ECEEE) Summer Study proceedings. European Council for an Energy Efficient Economy, pp. 145–153. URL: <https://irep.ntu.ac.uk/id/eprint/51521> (дата звернення 03.03.2025).
5. ДСТУ EN 16231:2017 Методологія бенчмаркінгу енергетичної ефективності (EN 16231:2012, IDT).
6. Розен В. П. Бенчмаркінг як засіб підвищення рівня енергоефективності промисловості України / В. П. Розен, Б. Л. Тишевич, В. Г. Городецький, П. В. Розен // Вісник Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”. Серія : Гірництво. – 2012. – Вип. 22. – С. 166–171. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VKPI_gir_2012_22_26 (дата звернення 03.03.2025).
7. Розен В. П. Методологія бенчмаркінгу енергоефективності для промисловості України / В. П. Розен, Б. Л. Тишевич, П. В. Розен // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2012. – № 6. – С. 9–19. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ecsee_2012_6_3 (дата звернення 03.03.2025).
8. Шестеренко В. Є. Системи електроспоживання та електропостачання промислових підприємств: підручник / В. Є. Шестеренко. – Вінниця: Нова Книга, 2004. – 656 с.
9. Правила улаштування електроустановок. Затверджено Наказом Міністерства енергетики України від 21.07.2017 № 476. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0476732-17#Text> (дата звернення 03.03.2025).
10. Yasmine Salehy, Hong-Minh Hoang, François Cluzel, Yann Leroy, Anthony Delahaye, et al. Energy performances assessment for sustainable design recommendations: Case study of a supermarket’s refrigeration system. 27th CIRP Life Cycle Engineering (LCE) Conference, May 2020, Grenoble, France. pp. 328–333. URL: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.01.102> (дата звернення 03.03.2025).
11. Дубодєлова А. В. Особливості та технологія внутрішнього бенчмаркінгу на підприємстві / А. В. Дубодєлова, О. В. Юринець // Маркетинг і менеджмент інновацій. – 2013. – № 2. – С. 64–73. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Mimi_2013_2_7 (дата звернення 03.03.2025).

References

1. The Law of Ukraine “On Energy Efficiency”. Version of 18.09.2024. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1818-20> (accessed 03.03.2025). (Ukr).
2. EU4Business: Annual report 2024. URL: <https://eu4business.org.ua/reports/eu4business-annual-report-2024/> (accessed 03.03.2025). (Ukr).
3. Deriy, V. The concept and significance of economic control for minimising costs and maximising profits of enterprises / V. Deriy // Accounting and Audit. – No. 2. – pp. 48–56. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/boau_2011_2_7 (accessed 03.03.2025). (Ukr).
4. Mazhar M. U., Domingues A. R., Bull R. and O’Boyle S., 2022. Small and medium-sized enterprises: hard to reach, data-poor but rich in creative potential as agents of change for

decarbonisation. In: European Council for an Energy Efficient Economy (ECEEE) Summer Study proceedings. European Council for an Energy Efficient Economy, pp. 145–153. URL: <https://irep.ntu.ac.uk/id/eprint/51521> (accessed 03.03.2025).

5. DSTU EN 16231:2017 Energy efficiency benchmarking methodology (EN 16231:2012, IDT). (Ukr).

6. Rosen V. P. Benchmarking as a means of increasing the level of energy efficiency of the Ukrainian industry / V. Rosen, B. Tyshevych, V. Gorodetskyi, P. Rosen // Bulletin of the National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”. Series: Mining. – 2012. – Issue 22. – pp. 166–171. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VKPI_gir_2012_22_26 (accessed 03.03.2025). (Ukr).

7. Rosen V. P. Methodology of energy efficiency benchmarking for the industry of Ukraine / V. P. Rosen, B. L. Tyshevych, P. V. Rosen // Energy saving. Energy. Energy audit–2012. – No. 6. – pp. 9–19. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ecee_2012_6_3 (accessed 03.03.2025). (Ukr).

8. Shesterenko, V. E. Systems of power consumption and power supply of industrial enterprises: textbook / V. E. Shesterenko – Vinnytsia: Nova Knyha, 2004. – 656 p.

9. Regulation for electrical installation. Approved by the Order of the Ministry of Energy and Coal Industry of Ukraine dated 21.07.2017 № 476. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0476732-17#Text> (accessed 03.03.2025). (Ukr).

10. Yasmine Salehy, Hong-Minh Hoang, François Cluzel, Yann Leroy, Anthony Delahaye, et al. Energy performances assessment for sustainable design recommendations: Case study of a supermarket’s refrigeration system. 27th CIRP Life Cycle Engineering (LCE) Conference, May 2020, Grenoble, France. pp. 328–333. URL: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.01.102> (accessed 03.03.2025).

11. Dubodelova, A. V. Features and technology of internal benchmarking at the enterprise / A. V. Dubodelova, O. V. Yurynets // Marketing and management of innovations. – 2013. – No. 2. – pp. 64–73. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Mimi_2013_2_7 (accessed 03.03.2025). (Ukr).

УДК 621.313.8

Базаров О. О., аспірант, ORCID 0009-0008-8491-2678,
науковий керівник: канд. техн. наук, доцент **М. А. Коваленко**,
Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

ПОРІВНЯННЯ ДВИГУНА З АКСІАЛЬНИМ МАГНІТНИМ ПОТОКОМ ТА ДВИГУНА ЦИЛІНДРИЧНОЇ КОНСТРУКЦІЇ З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ

COMPARISON OF AXIAL MAGNETIC FLUX MOTOR AND CYLINDRICAL MOTOR WITH PERMANENT MAGNETS

Анотація. У статті проведено порівняльний аналіз електродвигунів з постійними магнітами з аксіальним і циліндричним магнітним потоком. Розглянуто основні конструктивні особливості, електромагнітні параметри, ефективність та області застосування кожного типу. Наведено результати математичного моделювання та експериментальних досліджень. Бібл. 4, рис. 2, табл. 1.

Ключові слова: електродвигун, аксіальний магнітний потік, циліндрична конструкція, постійні магніти.

Abstract. The article presents a comparative analysis of permanent magnet electric drives with axial and cylindrical magnetic flux. The main structural features, electromagnetic parameters, efficiency, and application areas of each type are considered. The results of mathematical modeling and experimental research are provided. Ref. 4, Fig. 2, Tabl. 1.

Keywords: electric motor, axial magnetic flux, cylindrical structure, permanent magnets.

Вступ. Одним із ключових елементів сучасних електричних машин є електродвигуни з постійними магнітами. Вибір між традиційною циліндричною конструкцією та аксіальним магнітним потоком впливає на ефективність та надійність системи. Двигуни з аксіальним потоком мають компактніші розміри та меншу вагу, тоді як циліндричні двигуни відзначаються вищою механічною стійкістю.

Метою досліджень є проведення порівняльного аналізу електродвигунів з постійними магнітами з аксіальним магнітним потоком і двигунів традиційної циліндричної конструкції для визначення їх ефективності, конструктивних особливостей та можливостей застосування в різних умовах експлуатації.

Матеріал і результати досліджень. Конструктивні особливості. Двигун циліндричної конструкції характеризується класичною конфігурацією, де магнітне поле має радіальний розподіл. Основними перевагами є механічна міцність та надійність, однак такі двигуни мають більшу масу.

Двигун з аксіальним магнітним потоком має потік, що спрямований уздовж осі ротора, що дозволяє зменшити масо-габаритні параметри та підвищити питому потужність. Порівняння основних параметрів двигуна з аксіальним магнітним потоком та двигуна циліндричної конструкції наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Параметри двигунів

Параметр	Аксіальний магнітний потік	Двигун циліндричної конструкції
Індукція в повітряному проміжку (Тл)	0,43	0,32
Фазна ЕРС (В)	87	63
Електромагнітна потужність (Вт)	320	314
Маса постійних магнітів (кг)	1,7	0,94
Питома потужність (Вт/м ³)	3600	1500
ККД (%)	91,0	93,0
Номінальний момент (Н·м)	16,7	10,2

Результати моделювання доводять, що двигун з аксіальним магнітним потоком (рис. 1), забезпечує вище амплітудне значення магнітної індукції завдяки конструктивним особливостям. Це дозволяє підвищити питому потужність при різних функціональних призначеннях. Однак традиційний двигун (рис. 2), має менші втрати та вищий ККД.

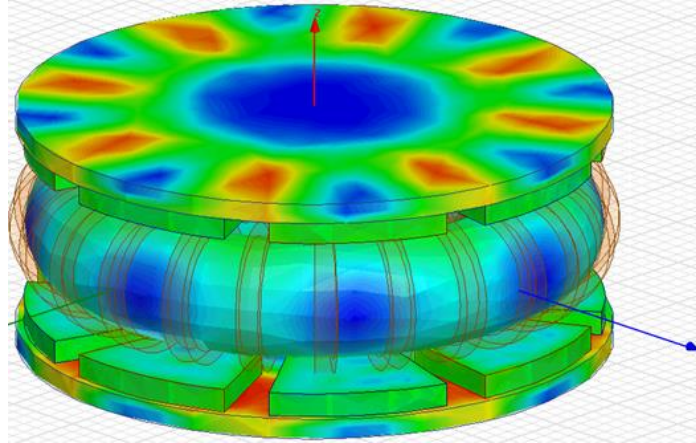


Рисунок 1. Розподіл електромагнітного поля для двохсторонньої конструкції з радіально-аксіальним магнітним потоком

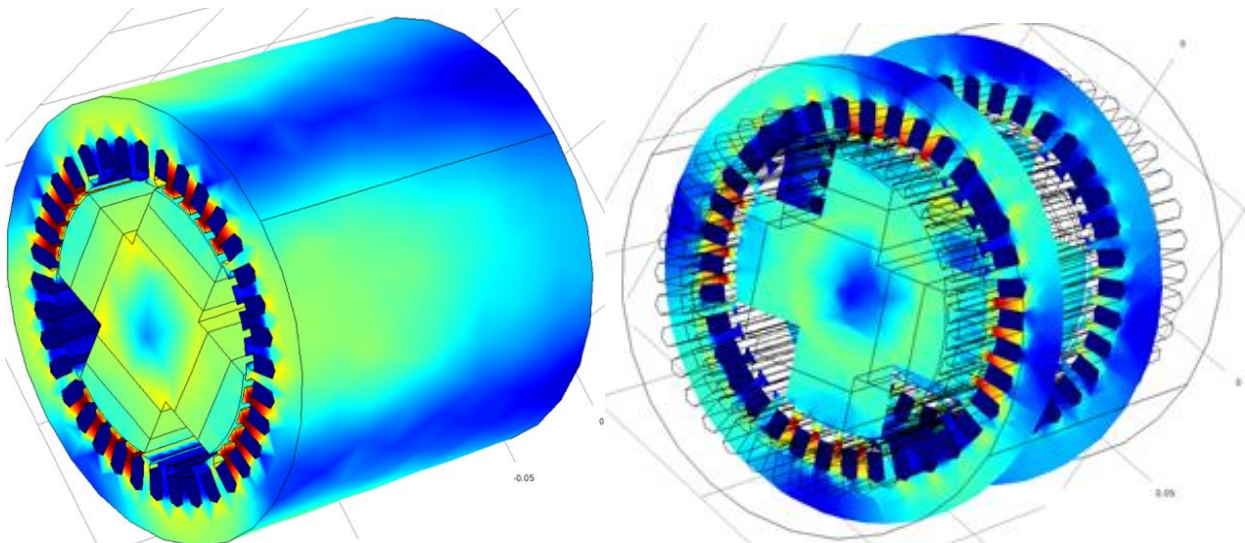


Рисунок 2. Розподіл електромагнітного поля в розрахунковій області циліндричного електродвигуна

Висновки. Двигуни з аксіальним магнітним потоком мають значні переваги у питанні питомої потужності, компактності та масо-габаритних показників. Вони особливо перспективні для застосування в мобільних транспортних засобах, включаючи електромобілі, безпілотні літальні апарати та інші високошвидкісні системи. Завдяки зниженій масі та меншому моменту інерції, такі двигуни дозволяють покращити динамічні

характеристики транспортних засобів, а їхня конструкція забезпечує кращі умови для ефективного охолодження.

Однак, попри переваги, двигуни з аксіальним магнітним потоком мають і деякі недоліки. Зокрема, їхній конструктивний дизайн складніший у виробництві, що може впливати на вартість та технологічність виготовлення. Крім того, вони потребують особливої уваги до механічної жорсткості та надійності кріплення елементів, щоб уникнути можливих деформацій під навантаженням.

Двигуни традиційної циліндричної конструкції, у свою чергу, відзначаються вищою механічною міцністю, що робить їх оптимальними для роботи у складних експлуатаційних умовах. Вони мають кращий показник ККД, що є важливим для промислових застосувань, де ключовими є енергоефективність і стабільність роботи.

Таким чином, вибір між цими двома типами двигунів залежить від конкретних вимог до системи:

Якщо пріоритетом є висока питома потужність, компактність і легкість — доцільніше використовувати двигуни з аксіальним магнітним потоком.

Якщо ж основними критеріями є механічна надійність, вища ефективність і стабільність у жорстких умовах експлуатації — кращим вибором буде традиційний циліндричний двигун.

Список використаних джерел

1. V. M. Golovko, M. Ya. Ostroverkhov, M. A. Kovalenko, I. Ya. Kovalenko, D. V. Tsyplenkov (2022) Mathematical simulation of autonomous wind electric installation with magnetoelectric generator: *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu.*, (5), 074-079. URL: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-5/074>.
2. Chumack Vadim and Bazenov Volodymyr and Tymoshchuk Oksana and Kovalenko Mykhailo and Tsyvinskyi Serhii and Kovalenko Iryna and Tkachuk Ihor, Voltage stabilization of a controlled autonomous magnetoelectric generator with a magnetic shunt and permanent magnet excitation (2021) *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(5 (114)), 56–62. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.246601 (ISSN 1729-3774).
3. Ostroverkhov M., Chumack V., Kovalenko M., & Kovalenko I. (2022) Development of the control system for taking off the maximum power of an autonomous wind plant with a synchronous magnetoelectric generator. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(2(118)), 67–78. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.263432>.
4. Gerada D.; Mebarki A.; Brown N. L.; Gerada C.; Cavagnino A.; Boglietti (2013) A High-speed electrical machines: Technologies, trends, and developments. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 61, 2946–2959. URL: <http://dx.doi.org/10.1109/TIE.2013.2286777>.

References

1. V. M. Golovko, M. Ya. Ostroverkhov, M. A. Kovalenko, I. Ya. Kovalenko, D. V. Tsyplenkov (2022) Mathematical simulation of autonomous wind electric installation with magnetoelectric generator: *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu.*, (5), 074-079. URL: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-5/074>.
2. Chumack Vadim and Bazenov Volodymyr and Tymoshchuk Oksana and Kovalenko Mykhailo and Tsyvinskyi Serhii and Kovalenko Iryna and Tkachuk Ihor, Voltage stabilization of a controlled autonomous magnetoelectric generator with a magnetic shunt and permanent magnet excitation (2021) *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(5 (114)), 56–62. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.246601 (ISSN 1729-3774).

3. Ostroverkhov M., Chumack V., Kovalenko M., & Kovalenko I. (2022) Development of the control system for taking off the maximum power of an autonomous wind plant with a synchronous magnetoelectric generator. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4(2(118)), 67–78. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.263432>.
4. Gerada D.; Mebarki A.; Brown N. L.; Gerada C.; Cavagnino A.; Boglietti (2013) A High-speed electrical machines: Technologies, trends, and developments. IEEE Trans. Ind. Electron., 61, 2946–2959. URL: <http://dx.doi.org/10.1109/TIE.2013.2286777>.

УДК 621.311

Копчиков О. М., аспірант, ORCID 0000-0001-7885-4055,
науковий керівник: канд. техн. наук, доцент **В. П. Калінчик**,
Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

ОПТИМІЗАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗАКУПІВЕЛЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НЕПОБУТОВИМ СПОЖИВАЧЕМ В УМОВАХ ОБМЕЖЕНЬ ТА НЕВИЗНАЧЕНОСТІ РИНКОВИХ ЦІН

OPTIMIZATION MODELING OF ELECTRICITY PROCUREMENT BY A NON-RESIDENTIAL CONSUMER UNDER SUPPLY CONSTRAINTS AND PRICE UNCERTAINTY

Анотація. У роботі вирішено задачу оптимального планування закупівель електроенергії непобутовим споживачем з урахуванням технічних обмежень та волатильності цін. Запропоновано стохастичну змішану цілочисельну лінійну модель, що визначає оптимальний розподіл закупівель між сегментами ринку України та Польщі за критерієм мінімізації сукупних витрат. Особливістю моделі є врахування імпорту, що знижує ризик незадоволення попиту. Апробацію виконано на реальних погодинних даних споживання промислового підприємства та фактичних ринкових цінах. Результати обчислювальних експериментів демонструють кількісні переваги оптимального розподілу закупівель, сприяючи економічно ефективному й стійкому енергозабезпеченню в кризових умовах. Бібл. 14, рис. 2.

Ключові слова: споживання електричної енергії, непобутовий споживач, ринок електричної енергії, дефіцит, гранична величина, оптимізаційне моделювання, управління.

Abstract. This paper addresses the problem of optimal electricity procurement planning for a non-residential consumer, considering technical constraints and price volatility. A stochastic mixed-integer linear programming model is proposed to determine the optimal allocation of purchases across market segments in Ukraine and Poland, minimizing total costs. A key feature of the model is the inclusion of imports, which reduces the risk of unmet demand. The model was validated using real hourly consumption data from an industrial enterprise and actual market prices. Computational experiments demonstrate the quantitative benefits of the optimal procurement allocation, contributing to economically efficient and resilient energy supply under crisis conditions. Ref. 14, Fig. 2.

Keywords: electricity consumption, non-household consumer, electricity market, shortage, constraint, optimization modeling, management.

Вступ. Надійне енергопостачання залишається критично важливим, особливо в умовах збройної агресії Російської Федерації проти України. В Україні діє модель ринку електроенергії (Закон “Про ринок електричної енергії”, 2017) [1], яка має на меті забезпечити стабільні поставки, розвиток конкуренції та зниження витрат. У межах воєнного стану діють спеціальні норми, що забороняють обмежувати електропостачання непобутовим споживачам із понад 60 % імпорту у структурі закупівель, стимулюючи диверсифікацію джерел та підвищення гнучкості енергозабезпечення [2].

Висока волатильність цін на різних сегментах ринку (ринок “на добу наперед”, внутрішньодобовий, балансуючий) ускладнює планування закупівель. Великі споживачі покладаються на прогнозні моделі та ринкові індикатори для мінімізації витрат і попередження ризиків [3]. Важливим аспектом є також врахування потенційних обмежень споживання в кризових ситуаціях: узимку 2022-2023 років планові відключення призвели до втрати до 35 % часу з доступом до електроенергії, що актуалізує необхідність кількісних інструментів для моделювання впливу різних рівнів дефіциту [4].

Таким чином, актуальним є завдання оптимізації закупівель електроенергії непобутовим споживачем з урахуванням технічних обмежень постачання та невизначеності ринкових цін.

Метою досліджень є визначення оптимального розподілу обсягів закупівлі електричної енергії між доступними сегментами ринку (внутрішнього та зовнішнього) за критерієм мінімізації сукупних витрат в умовах ймовірнісних сценаріїв, що охоплюють вплив обмежень електропостачання та волатильність ринку. Для досягнення поставленої мети в статті розв’язано такі завдання: розроблено стохастичну математичну модель, що враховує ймовірні сценарії дефіциту та динаміку ринкових цін; проаналізовано вплив технічних та регуляторних обмежень на структуру закупівель; проведено обчислювальні експерименти на основі реальних даних для кількісної оцінки запропонованого підходу.

Матеріал і результати досліджень. Теоретичні засади. В останніх дослідженнях оптимізації споживання та закупівлі електроенергії непобутовими споживачами широко застосовуються різні математичні методи. Найпоширенішим інструментом для детермінованих задач є змішане цілочисельне лінійне програмування (MILP), оскільки дає змогу враховувати дискретні рішення і лінійні залежності витрат. У випадках, коли потрібно моделювати невизначеність (волатильність цін, змінний попит, нестабільність генерації), використовують стохастичне програмування (зокрема дворівневі та двоетапні моделі), часто із критерієм CVaR для зменшення ризиків. Динамічне програмування й методи керування на основі моделей (MPC) застосовують переважно у сценаріях поетапного прийняття рішень, наприклад для управління навантаженням конкретного споживача. Евристичні та метаевристичні методи (генетичні алгоритми, ройові алгоритми тощо) корисні в задачах великої розмірності або надто складних для класичного програмування, зокрема для розроблення динамічних тарифів [5–8].

Більшість моделей зосереджена на мінімізації вартості електроенергії чи максимізації економічної вигоди. У разі дефіциту електроенергії можливі постановки на кшталт оптимального розподілу обмеженого ресурсу з урахуванням пріоритетів. Зустрічаються й багатоцільові моделі, що додатково враховують комфорт споживачів. Загалом, вибір між детермінованими чи стохастичними, одно- чи багатоцільовими, а також точними чи евристичними підходами визначається специфікою завдання, доступними даними та рівнем бажаного врахування ризиків [9, 10].

Постановка задачі. В даному дослідженні розглядається непобутовий споживач (велике промислове підприємство), який може закуповувати електроенергію на декількох сегментах ринку України (ринок “на добу наперед”, РДН, внутрішньодобовий, ВДР, тощо) та має можливість імпортувати електроенергію з зовнішнього ринку. Дано загальний прогнозований обсяг споживання електричної енергії на кожну годину доби $W_{\text{заг}}$.

Сформовано множину сценаріїв для моделювання невизначеності: (1) сценарії технічних обмежень – характеризують можливі рівні примусового обмеження споживання з боку оператора системи (наприклад, 0 %, 25 % або 50 % від вимоги споживача); (2) ринкові сценарії – відображають стан ринку електроенергії (баланс попиту і пропозиції) та пов’язані з ним коливання цін. Ринкові сценарії можуть будуватися на основі сезонних факторів, прогнозного попиту, а також з урахуванням випадкових подій (ремонт генеруючих потужностей, вихід з ладу мережевого електротехнічного обладнання тощо). Для кожного сценарію визначено ключові параметри: доступні обсяги електроенергії у кожному сегменті ринку та ціна електроенергії на цьому сегменті. Задача споживача полягає в тому, щоб за будь-якого поєднання технічного та ринкового сценаріїв покрити свій критичний попит i , наскільки можливо, гнучкий попит, мінімізуючи при цьому загальні витрати.

Математична модель. Для формального розв’язання описаної задачі запропоновано стохастичну оптимізаційну модель у вигляді змішаного цілочисельного лінійного програмування. Модель охоплює S можливих ринкових сценаріїв та декілька рівнів технічних обмежень T – у подальшому технічні сценарії враховано у вигляді відповідних параметрів моделі. Рішення моделі визначає, який обсяг закупити на кожному сегменті кожного ринку у сценарії s , щоб мінімізувати очікувані сукупні витрати. Введемо змінну $x_{i,s}$ – плановий обсяг закупівлі електроенергії на i -му сегменті (де різні сегменти включають, наприклад, РДН, ВДР, імпорتنний сегмент тощо) за s -м ринковим сценарієм. Цільова функція моделі формулюється як мінімізація математичного очікування витрат на закупівлю:

$$\min_{x_{i,s}} \sum_{s=1}^S p_{i,s} \sum_i C_{i,s} x_{i,s} \quad (1)$$

де $C_{i,s}$ – прогнозна ціна електроенергії на i -му сегменті в сценарії s ;

$p_{i,s}$ – ймовірність реалізації ринкового сценарію s . Врахування ймовірностей сценаріїв дозволяє моделі врахувати невизначеність ринкових умов через середнє (очікуване) значення витрат, надаючи більшу вагу більш імовірним сценаріям, але водночас беручи до уваги і менш ймовірні – для забезпечення стійкості рішення. Таким чином, оптимальне рішення мінімізує очікувані витрати, фактично балансує ризики: навіть якщо деякі несприятливі сценарії малоймовірні, модель все одно частково зменшує їхній вплив, враховуючи їх у розрахунках.

Обмеження моделі. Оптимізація здійснюється за умов задоволення ряду технічних та регуляторних обмежень.

Баланс споживання: сумарна закуплена електроенергія у кожному сценарії повинна покривати потребу споживача, це означає:

$$\sum_i x_{i,s,t} \geq \lambda_t \cdot W \quad (2)$$

для всіх сценаріїв S і рівнів технічних обмежень T . $\lambda_t \in [0,1]$ – допустима частка критичного попиту. Для гнучкого навантаження умови залежать від сценарію: без обмежень воно повністю покривається, інакше — зменшується відповідно до допустимого рівня (наприклад, при ліміті 25 % можна задовольнити до 75 % гнучкого попиту).

Обмеження по обсягах закупівель на сегментах ринку. Для кожного сегмента i , сценарію s та умов t : $x_{i,s,t} \in [x_i^{min}, x_i^{max}]$.

Регуляторні або інфраструктурні обмеження (пропускна здатність мережі, доступність міждержавних перетинів тощо). $x_{i,s,t} \leq x_i^{max} \cdot y_i, y_i \in \{0,1\}$

Альтернативне покриття у разі технічного відключення від внутрішнього ринку.

$$L_i^{(B)} \leq \sum_j^m x_{ij}^{(B)} \leq U_i^{(B)} \quad (3)$$

де $L_{ij}^{(B)}, U_{ij}^{(B)}$ – відповідно нижня та верхня прогнознi межi обсягу закупівлі на j -му сегменті i -го ринку за сценарієм B , що визначають допустимий діапазон закупівлі за прогнозною ціною $C_{ij}^{(B)}$.

Таким чином, сформована стохастична MILP-модель одночасно враховує економічні (вартість електроенергії), технічні (обмеження потужності) та регуляторні (правила імпорту при дефіциті) фактори. На відміну від детермінованих підходів, ця модель оцінює рішення на множині сценаріїв, що підвищує її стійкість до невизначеності.

Дані для моделювання. Для апробації моделі використано дані споживання побутового споживача – промислового підприємства (виробник продукції з пластмас) за одну добу (24 години) [11]. Погодинні обсяги споживання взято з відкритого набору даних. Припускається, що

0,15 МВт потреби постійно покрито за результатами торгів на РДД, інший обсяг підлягає оптимізації.

На основі аналізу реальної ситуації на ринку було сформовано два ринкові сценарії: Ринковий сценарій Р1 – відносно сприятлива ситуація, коли пропозиція електроенергії на внутрішньому ринку достатня для покриття попиту; Ринковий сценарій Р2 – дефіцитна ситуація, коли внутрішній ринок не може повністю забезпечити потреби споживача.

Сценарії побудовано на основі даних ринку за 23.08.2024 (Р1) та 24.08.2024 (Р2). Для обох використано фактичні ціни РДН і ВДР (АТ “Оператор ринку”) [12], а також ціни імпорту з Польщі (TGE) [13], перераховані за курсом НБУ.

Для технічних обмежень розглянуто два варіанти: Т1 – відсутність обмежень (ОСР не вводить лімітів споживання); Т2 – наявність обмежень, коли у визначені години оператор застосовує обмеження постачання. Зокрема, у сценарії Т2 вважається, що з 17:00 до 22:00 години на підприємство накладається обмеження споживання (наприклад, через дефіцит у енергосистемі). У Т2 внутрішнє постачання обмежене 40 % потреби в критичні години, решта (60%) повинна покриватися імпортом, що дозволяє уникнути відімкнення відповідно до [2]. Ризики, що пов’язані з фізичним правом на передачу [14] не враховано, але прийнято, що можливо забезпечити плановий обсяг на рівні 75 %. У Т1 таких обмежень не вводиться.

Результати оптимізації. Модель було реалізовано та розраховано для комбінацій сценаріїв Р1-Т1, Р1-Т2, Р2-Т1, Р2-Т2. Отримані оптимальні плани розподілу закупівель електроенергії між сегментами ринку порівнювалися між собою і з наявними обмеженнями. Відповідні графічні результати представлені на рис. 1–2 (умовно): сценарій Р1 (достатня пропозиція) та сценарій Р2 (дефіцит) кожен розглядаються без обмежень (Т1) і з обмеженнями (Т2).

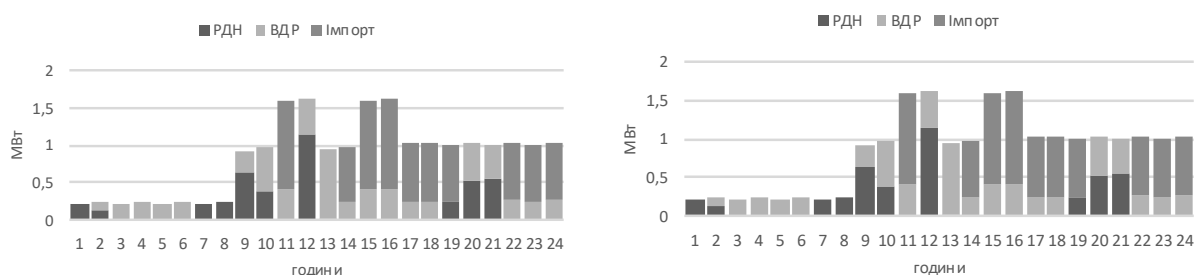


Рисунок 1. Графіки оптимального розподілу купівлі на сегментах ринку за ринковим сценарієм Р1 та сценаріїв технічних обмежень Т1 (справа) та Т2 (зліва)

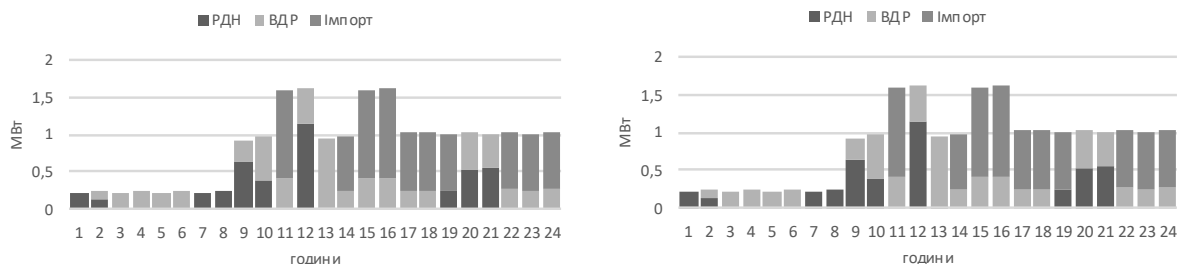


Рисунок 2. Графіки оптимального розподілу купівлі на сегментах ринку за ринковим сценарієм P1 та сценаріїв технічних обмежень T1 (праворуч) та T2 (ліворуч)

Обговорення результатів. Запропонований підхід інтегровано оцінює вплив різних сценаріїв обмежень та ринкових умов на витрати споживача й надійність енергопостачання. Використання нормативної умови щодо імпорту (60 %) компенсує наслідки технічних обмежень і, навіть у найгірших сценаріях, дає змогу безперебійно отримувати електроенергію за умов попереднього резервування каналів імпорту. При цьому сукупні витрати залишаються оптимально низькими завдяки балансуванню між дешевшими внутрішніми ресурсами та дорожчим імпортом.

Важливу роль відіграє точність прогнозування цін і доступних обсягів, тому підприємству необхідно здійснювати аналіз чутливості моделі на основі історичних даних. Це допоможе вчасно виявити критичні параметри (наприклад, недооцінений дефіцит чи різке зростання цін) і вжити заходів для зменшення потенційних ризиків.

Результати моделювання демонструють кількісні переваги оптимізованого розподілу закупівель порівняно з простішими стратегіями. Імпорт за потреби дозволяє запобігти переривання постачання без істотного зростання витрат, а оптимізаційний підхід мінімізує очікувану вартість, уникаючи як недооцінки дефіциту, так і надмірних витрат на передчасні закупівлі. Таким чином, розроблена модель підтверджує свою практичну цінність як інструмент підтримки прийняття рішень при управлінні споживанням непобутового споживача.

Наукова новизна. У рамках дослідження запропоновано новий підхід до стратегічного планування закупівель електроенергії непобутовим споживачем в умовах кризового дефіциту, що поєднує економічну оптимізацію з врахуванням регуляторних механізмів (імпорту). Наукова новизна роботи проявляється у наступному:

- Обґрунтування впливу імпорту на стійкість постачання. Вперше формально показано, як використання імпорту електроенергії (>60 %) здатне компенсувати локальні обмеження на внутрішньому ринку. Модель надає інструмент порівняльної оцінки з метою прийняття рішення “імпортувати чи ні” залежно від кризових умов і підтверджує можливість стабільної роботи споживача за достатнього рівня імпорту.

- Стохастична оптимізація закупівель з урахуванням ризиків. Розроблена стохастична MILP-модель враховує ймовірнісні сценарії (ціни, дефіцит, технічні обмеження), мінімізуючи очікувані витрати замість витрат за фіксованого прогнозу. Таким чином, рішення стає більш гнучким і надійним, оскільки враховує невизначеність ринку та ризик екстремальних ситуацій.

- Балансування між локальним ринком та імпортом як фактор стійкості. Запропоновано інтегрований підхід, що оптимально розподіляє закупівлі між вітчизняними та зовнішніми ринками, забезпечуючи мінімальні витрати й безперервність електропостачання. Введення в модель змінних та обмежень імпорту є новим аспектом, який розширює науково-методичні основи управління попитом, даючи змогу кількісно оцінити ефект диверсифікації поставки електричної енергії.

Висновки. У роботі запропоновано підхід до вирішення задачі оптимального планування закупівель електроенергії непобутовим споживачем з урахуванням обмежень постачання та невизначеності ринкових цін. На основі стохастичної MILP-моделі визначено оптимальний розподіл закупівель між сегментами ринку, що мінімізує сукупні витрати й забезпечує надійність електропостачання. Включення до стратегії імпорту (за умови доступності) суттєво підвищує здатність до швидкого переорієнтування на інші сегмента і стійкість споживача при відносно невеликому зростанні витрат.

Для практичного застосування результатів непобутовим споживачам рекомендується впроваджувати системи моніторингу та прогнозування ринку електроенергії, на базі яких можливо виконувати оптимізаційне планування закупівель, балансувати між різними сегментами (внутрішній ринок і імпорт), регулярно калібрувати та оновлювати оптимізаційну модель згідно з фактичними даними.

Напрями подальших досліджень включають розширення моделі через явні показники ризику (наприклад, CVaR) для формування більш консервативних стратегій та інтеграцію власних резервних джерел енергії (дизель-генератори, системи зберігання). Це забезпечить підвищення економічної ефективності та надійності роботи непобутових споживачів на енергетичних ринках.

Список використаних джерел

1. Про ринок електричної енергії: Закон України від 13.04.2017 № 2019-VIII: станом на 9 лют. 2025 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19> (дата звернення 07.03.2025).
2. Про затвердження Положення про особливості імпорту електричної енергії в умовах правового режиму воєнного стану в Україні: Постанова Каб. Міністрів України від 27.10.2023 № 1127: станом на 27 листоп. 2024 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1127-2023-п> (дата звернення 07.03.2025).
3. Полікевич Н. І. Індекси спотових ринків як орієнтири формування майбутніх цінових тенденцій на біржах електроенергії країн Східної Європи / Н. І. Полікевич // Бізнес Інформ. – 2016. – № 1. – С. 43–48. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/binf_2016_1_8. (дата звернення 07.03.2025).

4. Топалов М., Максимчук М. Скільки будемо без світла? Усе, що треба знати про відключення електроенергії. Економічна правда. 2024. 4 черв. URL: <https://epravda.com.ua/publications/2024/06/04/714678>. (дата звернення 07.03.2025).
5. Zheng S., Sun Y., Li B., Hu Y., Qi B., Shi K. and Li Y. (2020) Stochastic programming model for incentive-based demand response considering complex uncertainties of consumers. IET Gener. Transm. Distrib., 14: 4488–4500. URL: <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2020.0692> (дата звернення 07.03.2025).
6. Wang Bohong & Chin Hon & Varbanov Petar & Klemeš Jiri. (2020) A MILP-Based Iteration Method for Heat Exchanger Network Synthesis. 1–6. DOI: 10.23919/SpliTech49282.2020.9243853 (дата звернення 07.03.2025).
7. S. Taik and B. Kiss, “Selective and optimal dynamic pricing strategy for residential electricity consumers based on genetic algorithms,” Heliyon, vol. 8, No. 11, p. e11696, Nov. 2022, DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e11696 (дата звернення 07.03.2025).
8. A. R. Jordehi, “Two-stage stochastic programming for risk-aware scheduling of energy hubs participating in day-ahead and real-time electricity markets,” Sustainable Cities and Society, vol. 81, p. 103823, Jun. 2022, DOI: 10.1016/j.scs.2022.103823 (дата звернення 07.03.2025).
9. Samadi M.; Fattahi J.; Schriemer H.; Erol-Kantarci M. Demand Management for Optimized Energy Usage and Consumer Comfort Using Sequential Optimization. Sensors 2021, 21, 130. URL: <https://doi.org/10.3390/s21010130>. (дата звернення 07.03.2025).
10. Zamulko A. and Chernetska Y. and Prasol A. (2024) Determination of the Limit Values of Electric Energy Consumption Using Optimization Modeling. System Research in Energy, (1 (76), 27–34. URL: <https://doi.org/10.15407/srenergy2024.01.027>. (дата звернення 07.03.2025).
11. Погодинні ціни купівлі-продажу електроенергії. Оператор ринку. URL: <https://www.oree.com.ua/index.php/pricestr> (дата звернення 07.03.2025).
12. Electricity. Day-ahead market. TGE. URL: <https://www.tge.pl/> (дата звернення 07.03.2025).
13. Про затвердження Правил управління обмеженнями та Порядку розподілу пропускної спроможності мі-ждержавних перетинів: Постанова Нац. коміс., що здійснює держ. регулювання у сферах енергетики та комун. послуг від 03.04.2020 № 763: станом на 1 лют. 2022 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0763874-20> (дата звернення 07.03.2025).

References

1. On the Electricity Market: Law of Ukraine dated 13.04.2017 No. 2019-VIII: as of February 9. 2025 URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19> (accessed 07.03.2025). (Ukr).
2. On Approval of the Regulation on Peculiarities of Electricity Imports under the Legal Regime of Mar-tial Law in Ukraine : Decree of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated October 11, 2013. of Ministers of Ukraine dated 27.10.2023 No. 1127: as of November 27. 2024 URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1127-2023-п> (accessed 07.03.2025). (Ukr).
3. Polikevych N. I. Spot market indices as benchmarks for the formation of future price trends in the elec-tricity exchanges of Eastern Europe / N. I. Polikevych // Business Inform. – 2016. – № 1. – pp. 43–48. – Access mode: http://nbuv.gov.ua/UJRN/binf_2016_1_8. (accessed 07.03.2025). (Ukr).
- 4 Topalov M., Maksymchuk M. How long will we be without electricity? Everything you need to know about power outages. Economic truth. 2024. 4 June. URL: <https://epravda.com.ua/publications/2024/06/04/714678/> (accessed 07.03.2025). (Ukr).
5. Zheng S., Sun Y., Li B., Hu Y., Qi B., Shi K. and Li Y. (2020) Stochastic programming model for incentive-based demand response considering complex uncertainties of

consumers. IET Gener. Transm. Distrib., 14: 4488–4500. UR: <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2020.0692> (accessed 07.03.2025).

6. Wang Bohong & Chin Hon & Varbanov Petar & Klemeš Jiri. (2020). A MILP-Based Iteration Method for Heat Exchanger Network Synthesis. 1-6. DOI: 10.23919/SpliTech49282.2020.9243853 (accessed 07.03.2025).

7. S. Taik and B. Kiss, “Selective and optimal dynamic pricing strategy for residential electricity consumers based on genetic algorithms,” Heliyon, vol. 8, No. 11, p. e11696, Nov. 2022, DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e11696 (accessed 07.03.2025).

8. A. R. Jordehi, “Two-stage stochastic programming for risk-aware scheduling of energy hubs participating in day-ahead and real-time electricity markets,” Sustainable Cities and Society, vol. 81, p. 103823, Jun. 2022, DOI: 10.1016/j.scs.2022.103823 (accessed 07.03.2025).

9. Samadi, M.; Fattahi, J.; Schriemer, H.; Erol-Kantarci, M. Demand Management for Optimized Energy Usage and Consumer Comfort Using Sequential Optimization. Sensors 2021, 21, 130. URL: <https://doi.org/10.3390/s21010130> (accessed 07.03.2025).

10. Zamulko A. and Chernetska Y. and Prasol A. (2024) Determination of the Limit Values of Electric Energy Consumption Using Optimization Modeling. System Research in Energy, (1 (76), 27–34. URL: <https://doi.org/10.15407/srenergy2024.01.027> (accessed 07.03.2025).

11. Angizeh Farhad; Ghofrani Ali; Jafari Mohsen A. (2020) “Dataset on Hourly Load Profiles for a Set of 24 Facilities from Industrial, Commercial, and Residential End-use Sectors”, Mendeley Data, V1, DOI: 10.17632/rfnp2d3kjp.1 (accessed 07.03.2025). (Ukr).

12. Hourly prices for the purchase and sale of electricity. Market operator. URL: <https://www.oree.com.ua/index.php/pricetr> (accessed 07.03.2025).

13. Electricity. Day-ahead market. TGE. URL: <https://www.tge.pl/> (accessed 07.03.2025).

14. On approval of the Rules for managing restrictions and the Procedure for allocating the capacity of interstate crossings: Resolution of the National Energy and Utilities Regulatory Commission of Ukraine No.763 of 03.04.2020: as of February 1, 2020. 2022 URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0763874-20> (accessed 07.03.2025). (Ukr).

УДК 621.311

Прищепя Я. О., аспірант, ORCID: 0009-0008-5049-4826,
науковий керівник: канд. техн. наук, доцент **А. І. Замулко**,
Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

ОЦІНКА РИЗИКІВ ІНДИКАТИВНОГО ПОКАЗНИКА БЕЗПЕКИ ПОСТАЧАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

RISK ASSESSMENT OF THE INDICATIVE INDICATOR FOR SECURITY OF ELECTRICITY SUPPLY

***Анотація.** В роботі досліджено оцінку ризиків індикативного показника безпеки постачання електричної енергії. Основна увага приділена аналізу можливих ризиків та їх впливу на надійність енергопостачання. Розглянуто ключові чинники, що можуть спричиняти відхилення індикативного показника, а також методи їх ідентифікації та оцінки. Первинна оцінка ризиків дозволить удосконалити систему моніторингу та підвищити рівень безпеки постачання електроенергії. Бібл. 6, табл. 2.*

Ключові слова: безпека постачання електроенергії, оцінка ризиків, матриця ризиків, метод аналізу видів і наслідків відмов, балансування енергосистеми.

Abstract. The paper investigates the risk assessment of the indicative indicator of electricity supply security. The main attention is paid to the analysis of possible risks and their impact on the reliability of energy supply. The key factors that may cause deviations of the indicator, as well as methods of their identification and assessment are considered. The initial risk assessment will improve the monitoring system and increase the level of security of electricity supply. Ref. 6, Tabl. 2.

Keywords: security of electricity supply, risk assessment, risk matrix, method of analyzing types and consequences of failures, power system balancing.

Вступ. Оцінка ризиків [1] індикативного показника безпеки постачання електричної енергії є важливим завданням для забезпечення стабільності енергосистеми. Постає необхідність використання індикативного підходу та статистичних методів для аналізу можливих ризиків, що можуть впливати на рівень безпеки енергопостачання. Врахування міжнародного та національного досвіду дозволить визначити ключові ризики, встановити порогові значення індикативного показника та розробити алгоритм оцінки ризиків [2], що сприятиме підвищенню надійності постачання електроенергії.

Мета роботи та завдання. Метою роботи є формування підходів до оцінки ризиків показника з яких складається безпека постачання електричної енергії.

Задачами роботи є:

- проаналізувати Звіт “Про результати моніторингу безпеки постачання електричної енергії” Міністерства енергетики України та сформулювати перелік ризиків, які є складовими індикаторів безпеки постачання електричної енергії;
- порівняти методи оцінки ризиків (матриця ризиків та аналіз видів і наслідків відмов) та обґрунтувати доцільність їх застосування;
- проаналізувати основні ризики індикатора безпеки постачання електроенергії за допомогою методу аналіз видів і наслідків відмов.

Матеріал і результати досліджень. Ризики та заходи безпеки постачання електроенергії. Ризик в розрізі безпеки постачання електричної енергії охоплює різні загрози, які можуть вплинути на стабільність та надійність постачання електроенергії споживачам [3].

Основні ризики безпеки постачання електричної енергії можна поділити на наступні категорії:

1. Технічні ризики: Пошкодження обладнання, аварії на електростанціях та лініях електропередачі можуть призвести до перерви в постачанні електроенергії.
2. Кібербезпека: Кібератаки на системи керування електричними мережами можуть вивести з ладу енергетичну інфраструктуру, що загрожує стабільності постачання.
3. Ринкові ризики: Коливання цін на енергоносії та зміни в законодавстві можуть вплинути на стабільність постачання електроенергії.

4. Політичні та зовнішні ризики: Напружені відносини з країнами-постачальниками енергоносіїв можуть призвести до порушення постачання.

Аналіз ризиків індикативного показника безпеки постачання електричної енергії може бути ефективно інтегрований у цикл PDCA (Plan-Do-Check-Act), що забезпечує безперервне вдосконалення системи управління ризиками. Застосування циклу PDCA до аналізу ризиків індикативного показника дозволяє створити гнучку систему управління, яка своєчасно реагує на нові загрози та забезпечує стабільність електропостачання. Це особливо важливо в умовах інтеграції української енергосистеми до європейської мережі та необхідності відповідати міжнародним стандартам надійності та безпеки.

Оцінка рівня безпеки постачання електричної енергії складається з п'яти середньозважених інтегральних індикаторів [4] (складових безпеки постачання електричної енергії), які наведені в табл. 1.

Таблиця 1. Індикатори безпеки постачання електричної енергії

Безпека постачання електричної енергії				
індекс забезпечення балансової надійності енергосистеми і якості та рівня технічного обслуговування електричних мереж	індекс забезпечення первинними енергоресурсами за видами та джерелами їхнього постачання	індекс безперебійного функціонування ринку електричної енергії	індекс забезпечення операційно і безпеки	індекс кібербезпеки та захисту критичної інфраструктури у сфері електроенергетики

Аналіз ризиків індексу забезпечення балансової надійності енергосистеми і якості та рівня технічного обслуговування електричних мереж. В процесі дослідження розглядалися дані, які представлені в Звіті Міністерства енергетики України за 2021 рік [5]. В процесі дослідження були використані ризики індексу забезпечення балансової надійності енергосистеми і якості та рівня технічного обслуговування електричних мереж згідно даних зазначеного звіту. Слід зазначити, що у звіті був використаний так званий методу матриці ризиків, що базується на оцінці ризиків за ймовірністю їхнього виникнення та рівнем впливу. Матриця ризиків є корисним інструментом для попередньої оцінки загроз, але її варто поєднувати з іншими методами (наприклад, Монте-Карло або FMEA) для отримання глибшого аналізу та точніших прогнозів.

При аналізі ризиків індикатора пропонується застосувати метод аналізу видів і наслідків відмов (Failure Modes and Effects Analysis, FMEA). Зазначений метод забезпечує більш глибокий і структурований підхід до аналізу ризиків, дозволяючи точно визначати критичні відмови, їхні причини та способи усунення.

Оцінка здійснюється за шкалою від 1 до 10, де 10 – найвищий рівень ризику. Наступним кроком буде розрахунок RPN (Risk Priority Number) за формулою:

$$RPN = O \times S \times D. \quad (1)$$

Згідно Наказу Міненерговугілля “Про затвердження Правил про безпеку постачання електричної енергії” від 27.08.2018 № 448 [6] оцінювати ризики слід з урахуванням впливу превентивних заходів і результатів моніторингу безпеки постачання електричної енергії. Проаналізовано ризики за допомогою метода аналізу видів і наслідків відмов. Результати наведено в табл. 2.

Таблиця 2. Проаналізовані ризики індикатора безпеки постачання електричної енергії за допомогою метода аналізу видів і наслідків відмов

Ризик	RPN
Ризик розвитку генеруючих потужностей	378
Ризик недостатності ринкових стимулів	320
Ризик балансових обмежень	441
Ризик негативного впливу НПСВ	288
Ризик недофінансування мереж	567
Ризик втрати позицій в рейтингу	336
Ризик зниження надійності електропостачання	432
Ризик зниження рівня обслуговування	336

Найбільш критичні ризики – недофінансування електромереж ($RPN = 567$), балансові обмеження ($RPN = 441$) та зниження надійності електропостачання ($RPN = 432$). Вони потребують першочергової уваги.

Висновки. Ідентифіковано основні ризики постачання електроенергії та запропоновано систему їх оцінки на основі індикативних показників.

Доведено перевагу методу аналізу видів і наслідків відмов над методом матриці ризиків завдяки його деталізованому аналізу та інтеграції у процеси управління якістю.

Визначено найбільш критичні ризики (недофінансування електромереж, балансові обмеження, зниження надійності електропостачання) та запропоновано заходи для їх мінімізації.

Список використаних джерел

1. Jieyu Liu, Deqiang Li (2022) Research Advances in Energy Investment Risk Management – A Bibliometric Perspective. 1126–1131. URL: <https://doi.org/10.4236/ajibm.2022.126060> (дата звернення 10.02.2025).
2. Iwona Gorzeń-Mitka and Monika Wiczorek-Kosmala (2023). Mapping the Energy Sector from a Risk Management Research Perspective: A Bibliometric and Scientific Approach. 16(4), 2024; URL: <https://doi.org/10.3390/en16042024> (дата звернення 10.02.2025).
3. M. M. Ouabira. (2023) Risk Analysis in Energy Program Management. European Journal of Business and Management Research, 90-91. URL: <http://dx.doi.org/10.24018/ejbmr.2023.8.4.1997> (дата звернення 10.02.2025).
4. Прищепа Я.; Замулко А. (2024) Використання індикативного підходу для оцінки безпеки постачання електричної енергії. Системні дослідження в енергетиці, (4 (80), 134–142. URL: <https://doi.org/10.15407/srenergy2024.04.132> (дата звернення 10.02.2025).

5. Про результати моніторингу безпеки постачання електричної енергії: Звіт Міністерства енергетики України за 2021 рік. URL: <https://mev.gov.ua/> (дата звернення 10.12.2021).

6. Про затвердження Правил про безпеку постачання електричної енергії: Наказ Міністерства енергетики та вугільної промисловості України від 27.08.2018 № 448. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1076-18#Text> (дата звернення 01.05.2023).

References

1. Jieyu Liu, Deqiang Li (2022) Research Advances in Energy Investment Risk Management – A Bibliometric Perspective. 1126–1131. URL: <https://doi.org/10.4236/ajibm.2022.126060> (accessed 10.02.2025).

2. Iwona Gorzeń-Mitka and Monika Wieczorek-Kosmala (2023). Mapping the Energy Sector from a Risk Management Research Perspective: A Bibliometric and Scientific Approach. 16(4), 2024; URL: <https://doi.org/10.3390/en16042024> (accessed 10.02.2025).

3. M. M. Ouabira. (2023) Risk Analysis in Energy Program Management. European Journal of Business and Management Research, 90–91. URL: <http://dx.doi.org/10.24018/ejbmr.2023.8.4.1997> (accessed 10.02.2025).

4. Pryshchepa Y.; Zamulko A. (2024) USING AN INDICATIVE APPROACH TO ASSESSING THE SECURITY OF ELECTRICITY SUPPLY. System Research in Energy, (4 (80), 134–142. URL: <https://doi.org/10.15407/srenergy2024.04.132> (accessed 10.02.2025).

5. Ministry of Energy of Ukraine. On the results of monitoring the security of electricity supply (2021 year). URL: <https://mev.gov.ua/> (accessed 10.12.2021) (Ukr).

6. On Approval of the Rules on Security of Electricity Supply: Order of the Ministry of Energy and Coal Industry of Ukraine of 27.08.2018 No. 448. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1076-18#Text> (accessed 01.05.2023). (Ukr).

УДК 621.31

Карпенко А. В., аспірант, ORCID 0009-0004-5787-4750,
науковий керівник: канд. техн. наук, доцент **О. В. Коцар**,
Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

ВИЗНАЧЕННЯ ПРІОРИТЕТНИХ СЕКТОРІВ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ПЛАНУВАННЯ В МУНІЦИПАЛІТЕТАХ

DETERMINATION OF PRIORITY SECTORS FOR ENERGY PLANNING IN MUNICIPALITIES

***Анотація.** У статті досліджено актуальні проблеми енергетичного планування в муніципалітетах України. Акцентовано увагу на важливості енергетичного, моніторингу та контролю за використанням енергетичних ресурсів для забезпечення сталого розвитку та екологічної безпеки. Виконано аналіз затвердженої Міністерством розвитку громад, територій та інфраструктури України методіку розроблення місцевих енергетичних, а також підтримки та моніторингу реалізації таких планів з боку Державного агентства з питань енергоефективності та енергозбереження. Практичний аспект дослідження базується на аналізі енергоспоживання муніципальних об'єктів міста Запоріжжя, що дозволяє оцінити результативність впроваджених енергоефективних заходів та їх вплив на зниження споживання енергоресурсів. Бібл. 4, рис. 9, табл. 1.*

Ключові слова: енергетична ефективність, енергетичний менеджмент, енергомоніторинг, енергоспоживання, енергетичне планування, муніципалітет, сталий розвиток.

Abstract. The paper examines the current problems of energy planning in municipalities of Ukraine. Attention is focused on the importance of energy monitoring and control over the energy resources using to ensure sustainable development and environmental safety. The methodology for developing local energy plans approved by the Ministry of Community Development, Territory and Infrastructure of Ukraine, as well as support and monitoring of the implementation of such plans by the State Agency for Energy Efficiency and Energy Saving, is analyzed. The practical aspect of the study is based on the analysis of energy consumption of municipal facilities in the Zaporizhzhia city, which allows assessing the performance of the implemented energy efficiency measures and their impact on reducing energy consumption. Ref. 4, fig. 9, tabl. 1.

Keywords: energy efficiency, energy management, energy monitoring, energy consumption, energy planning, municipality, sustainable development.

Вступ. Нагальні виклики сьогодення, зокрема, скорочення використання викопного палива та запобігання змінам клімату вимагає від органів державної влади та місцевого самоврядування запровадження продуктивних механізмів раціонального та ощадливого природокористування, зокрема, ефективного енерговикористання. Муніципалітети, як основні адміністративні одиниці, мають значний потенціал для підвищення рівня енергетичної ефективності, скорочення споживання енергоресурсів та зменшення шкідливого впливу на довкілля. Саме тому впровадження в муніципалітетах систем енергетичного менеджменту (СЕНМ) є одним з найпріоритетніших завдань.

Однією з найвагоміших складових енергетичного менеджменту і стратегії ефективного використання енергетичних ресурсів на рівні муніципалітетів є процеси енергетичного планування, моніторингу та контролю використання енергетичних ресурсів, що дозволяє відстежувати поточні рівні енергоспоживання в режимі, близькому до реального часу, і сприяє своєчасному виявленню та усуненню нераціональних витрат енергії, а також є основою для формування інформаційного забезпечення завдань управління енерговикористанням. Пріоритетні напрями енергомоніторингу в муніципалітетах охоплюють не лише технологічні аспекти, а й організаційні, економічні та соціальні. Зокрема, це передбачає планування процесів збирання, оброблення та аналізу даних про енерговикористання, автоматизацію та інтеграцію із системами управління смартмістами, підвищення енергоефективності будівель, перехід на електротранспорт, управління вуличним освітленням тощо, а також оцінку та зменшення викидів парникових газів. Енергетичне планування має важливе значення не лише для економії коштів, але й для досягнення цілей сталого розвитку та забезпечення екологічної безпеки на місцевому рівні.

Метою досліджень є визначення пріоритетних секторів енергетичного планування в муніципалітетах з урахуванням економічних показників та рівнів енерговикористання муніципальних об'єктів, що має забезпечити

ефективне управління енергетичними ресурсами та підтримку сталого розвитку на місцевому рівні.

Матеріали і результати дослідження. З огляду на важливість енергетичної ефективності в муніципальних структурах, одним із ключових напрямів виконання є Методика розроблення місцевих енергетичних планів, затверджена наказом Міністерства розвитку громад, територій та інфраструктури України від 21 грудня 2024 року № 1163 (далі – Методика) [1]. Цей нормативно-правовий документ надає муніципалітетам чіткі інструкції для розробки енергетичних планів, що сприятиме не лише підвищенню ефективності використання енергетичних ресурсів, а й зниженню витрат на енергопостачання, зменшенню негативного впливу на довкілля та забезпеченню сталого розвитку місцевих громад.

Методика [1] передбачає три головні напрями впливу муніципалітетів у сфері енерговикористання: **управління, регулювання та фінансування** енергетичних проєктів. Це дозволяє місцевим органам самоврядування створити структурований план дій, що охоплює оцінку поточного енергоспоживання в різних секторах, визначення потенціалу для покращення енергоефективності, а також розробку конкретних заходів для скорочення енергетичних витрат, зокрема, модернізацію інфраструктури, впровадження нових енергозберігаючих технологій та інтеграцію систем енергомоніторингу, що забезпечують регулярний контроль за використанням енергії на всіх муніципальних рівнях.

За [1] визначається рівень впливу міської ради та її виконавчих органів на кожен сектор енергоспоживання за трьома головними напрямками. Першим напрямом є **управлінський вплив**, який полягає у прийнятті управлінських рішень у відповідному секторі. Другим напрямом є **регуляторний вплив**, що охоплює розробку та впровадження регуляторних актів, зокрема, встановлення тарифів на комунальні послуги та інші регулювання. Третім напрямом є **фінансовий вплив**, який проявляється у забезпеченні операційної діяльності та розвитку сектору через виділення коштів з місцевого бюджету для фінансування відповідних заходів (рис. 1).



Рисунок 1. Основні напрями впливу на процеси енергетичного планування в муніципалітетах

Управлінський вплив органу місцевого самоврядування (ОМС) на діяльність у секторі може бути прямим чи опосередкованим. ОМС можуть чинити **безпосередній управлінський вплив** на операційну та інвестиційну діяльність у секторі, що передбачає прийняття рішень щодо розвитку інфраструктури, реалізації великих проєктів і визначення пріоритетних напрямів діяльності. ОМС також можуть безпосередньо впливати на функціонування суб'єктів господарювання через організаційні рішення. У випадку **опосередкованого впливу** ОМС відіграє обмежену, але важливу роль, що проявляється в управлінні комунальними підприємствами, підтримці проєктів державно-приватного партнерства, наданні земельних ділянок для бізнесу та наданні фінансової підтримки через бюджетні кошти. ОМС також здійснюють контроль за витратами та ефективністю використання коштів на різні інфраструктурні та соціальні проєкти. Якщо ж ОМС не чинять жодного прямого або опосередкованого впливу на управлінські рішення в секторі, суб'єкти господарювання діють незалежно від місцевої влади, що несе ризики неефективного використання ресурсів, відсутності координації та виникнення конфліктів інтересів, і тягне за собою зниження інвестиційної привабливості, соціальну напруженість і можливість корупційних зловживань. **Регуляторний вплив** ОМС можуть чинити **прямий регуляторний вплив** через регулювання діяльності суб'єктів на місцевому рівні, що охоплює встановлення норм і стандартів, які регулюють господарську діяльність, діяльність у сфері ліцензування і тарифної політики на комунальні послуги, проведення конкурсів на визначення надавачів послуг, а також контроль за умовами доступу до місцевих інженерних мереж. **Опосередкований регуляторний вплив** чиниться через можливість встановлювати місцеві податки та збори, які можуть суттєво впливати на діяльність бізнесу в регіоні. Крім того, ОМС здійснюють контроль за дотриманням законодавчих норм, застосовують санкції за порушення екологічних та інших регуляторних вимог. Якщо **вплив відсутній**, ОМС не мають повноважень впливати на діяльність підприємств чи регулювати їх через місцеві закони або регулювання. У такому випадку суб'єкти господарювання не залежать від місцевих органів влади в частині регуляторних вимог.

Фінансування сектору ОМС можуть чинити **прямий фінансовий вплив** через фінансування поточних і капітальних витрат, а також оплати наданих послуг за рахунок коштів місцевого бюджету. Це охоплює реалізацію важливих соціальних та інфраструктурних проєктів, а також надання фінансової підтримки місцевим підприємствам та установам для забезпечення стабільності в роботі сектору. У разі **опосередкованого фінансового впливу**, місцевий бюджет може фінансувати програми, які стимулюють розвиток сектору, як от субсидіювання капітальних вкладень або поточних витрат через дотації та внески до статутного капіталу комунальних підприємств. Також можливе надання місцевих гарантій або кредитів для підприємств, що здійснюють важливі інвестиції в інфраструктуру чи інші сфери. Якщо **вплив відсутній**, ОМС не здійснюють

фінансування поточних чи капітальних витрат для суб'єктів господарювання в секторі. Місцевий бюджет не передбачає коштів на співфінансування витрат бізнесу або проєктів, що потребують державної підтримки.

Практичне застосування [1] несе муніципалітетам низку переваг. По-перше, це дозволяє забезпечити комплексний підхід до управління енергетичними процесами в межах громади, що підвищує ефективність використання енергетичних ресурсів. По-друге, завдяки чітко визначеним регуляторним вимогам і механізмам фінансування, місцеві органи мають змогу залучати фінансові ресурси для реалізації енергоефективних проєктів, що охоплює як державне, так і міжнародне фінансування, та дозволяє громадам впроваджувати інноваційні технології і практики без значних фінансових витрат з бюджету. Окрім того, методика стимулює громадян до участі в підвищенні рівня енергоефективності через прозорі механізми моніторингу і зворотного зв'язку, що, в свою чергу, призводить до зниження загальних витрат на енергію та покращення екологічної ситуації на місцевому рівні.

Згідно з Методикою [1] одним з надважливих аспектів реалізації місцевих енергетичних планів (МЕП) є залучення Державного агентства з енергоефективності та енергозбереження України (Держенергоефективності) до підтримки та моніторингу процесу розробки і впровадження цих планів на місцевому рівні. Держенергоефективності забезпечує методичну, консультативну та організаційну підтримку муніципалітетів у розробці МЕП, а також здійснює контроль за їх виконанням. Зокрема, Держенергоефективності надаватиме рекомендації щодо енергоефективних заходів, а також координуватиме взаємодію між місцевими органами влади, підприємствами, фінансовими установами та іншими зацікавленими сторонами для забезпечення ефективного впровадження МЕП. Важливою частиною роботи Держенергоефективності буде забезпечення інформаційної підтримки та навчання для представників місцевих органів влади, що дозволить підвищити їхню кваліфікацію в питаннях енергетичної політики та управління енергетичними ресурсами.

Окрім того, Держенергоефективності здійснюватиме моніторинг результатів реалізації МЕП та надаватиме відповідні звіти про прогрес в досягненні цілей щодо зниження енергоспоживання, підвищення енергоефективності та скорочення викидів парникових газів. Це дасть можливість оперативно коригувати заходи за необхідності, забезпечуючи таким чином досягнення встановлених цілей сталого енергетичного розвитку на місцевому рівні.

Відповідно до вищезазначеного для досягнення певної заявленої мети виконано аналіз даних енергоспоживання муніципальних об'єктів, а саме міста Запоріжжя з населенням 710 052 тис. осіб станом на 1 січня 2022 року, а станом на 2024 рік менше 500 тис. осіб, що дозволяє оцінити використання енергетичних ресурсів на місцевому рівні та визначити вплив реалізованих в цей період енергоефективних заходів на зниження енергоспоживання та підвищення рівня енергоефективності муніципалітету.

Опрацьовано інформацію Запорізької міської ради, що визначає сектори енергетичного планування, та проведено моніторинг використання паливно-енергетичних ресурсів (ПЕР) у 2019–2023 роках бюджетними установами, 523 будівлі яких охоплено автоматизованим енергомоніторингом на базі платформи Umuni [2]. У табл. 1 наведено динаміку енергоспоживання за минулі п'ять років бюджетними установами, які забезпечено фінансуванням з бюджету м. Запоріжжя.

Таблиця 1. Динаміка енергоспоживання бюджетних установ м. Запоріжжя

№ з/п	Вид енергоресурсу	Споживання				
		2019 рік	2020 рік	2021 рік	2022 рік	2023 рік
1	Природний газ, тис. м ³	202,729	145,207	81,984	82,887	81,785
2	Теплова енергія, тис. Гкал	123,846	109,179	136,291	105,369	92,872
3	Електрична енергія, млн кВт·год	27,902	22,765	27,933	20,593	18,331
4	Гаряче водопостачання, тис. м ³	153,766	125,893	142,299	36,375	0,000
5	Холодне водопостачання, тис. м ³	885,280	792,033	693,587	564,618	499,255
6	Водовідведення, тис. м ³	1008,092	878,765	829,800	592,233	486,574

Споживання природного газу

У 2019–2023 роках спостерігалася стійка тенденція до зменшення споживання природного газу (рис. 2). У 2023 р. в порівнянні з 2019 р. споживання природного газу зменшилося на 120,944 тис. м³ (40,34 %). В порівнянні з 2022 роком споживання зменшилося на 1,102 тис. м³ (1,33 %). Найбільшими споживачами природного газу в м. Запоріжжі (рис. 3) є заклади освіти і науки (61 % від загального споживання), охорони здоров'я (36 %), культури і туризму (3 %).

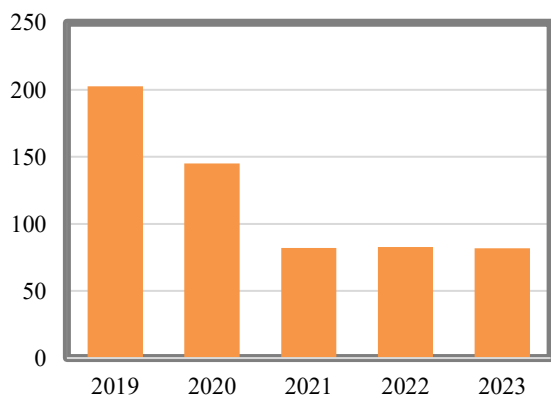


Рисунок 2. Динаміка споживання природного газу у 2019–2023 рр., тис. м³

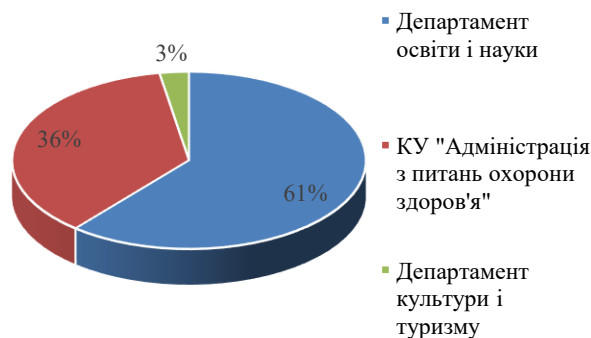


Рисунок 3. Частка споживання природного газу за 2023 рік, %

Споживання теплової енергії

Зменшення споживання теплової енергії у 2023 році в порівнянні з 2019 роком склало 30,974 тис. Гкал (74,98 %). В порівнянні з 2022 роком споживання зменшилося на 12,497 тис. Гкал (11,86 %), рис. 4.

Восени 2021 року для забезпечення теплопостачання в першу чергу закладів охорони здоров'я рішенням міської ради від 16.04.2021 № 139, [3] було продовжено опалювальний період у м. Запоріжжі з 07.04.2021 до 19.04.2021, що спричинило зростання споживання теплової енергії на 24,8 % до попереднього року. У 2022–2023 роках через введення воєнного стану в Україні більшість міських закладів культури, спорту, освіти тимчасово не працювали або перейшли на дистанційну форму роботи, що призвело до скорочення споживання всіх видів енергоресурсів. Найбільшими споживачами теплової енергії (рис. 5) є заклади освіти і науки (73 %) та заклади охорони здоров'я (19 %).

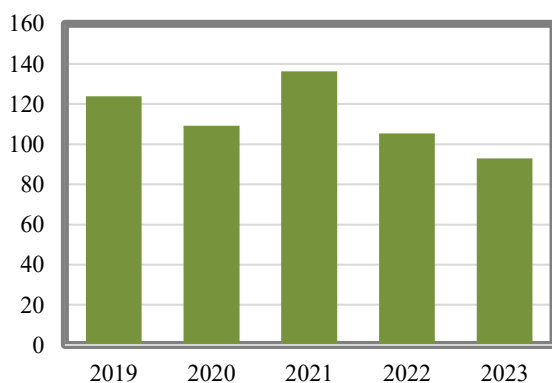


Рисунок 4. Динаміка споживання теплової енергії у 2019–2023 рр., тис. Гкал



Рисунок 5. Частка споживання теплової енергії за 2023 рік, %

Споживання електричної енергії

Споживання електричної енергії у 2023 році зменшилося на 9,571 млн кВт·год (34,3 %) до 2019 року. В порівнянні з 2022 роком споживання зменшилося на 2,262 млн кВт·год (11,0 %), рис. 6.

Споживання електричної енергії зменшилося через те, що більшість міських закладів культури, спорту, освіти тимчасово не працювали або перейшли на дистанційну форму роботи після введення воєнного стану в Україні.

Найбільшим споживачем електроенергії (рис. 7) є заклади охорони здоров'я (54 %).

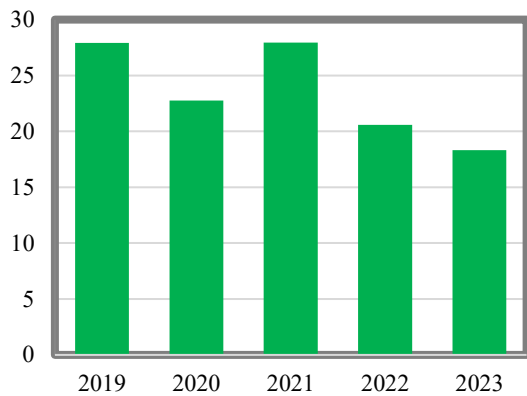


Рисунок 6. Динаміка споживання електричної енергії у 2019–2023 рр., млн кВт·год

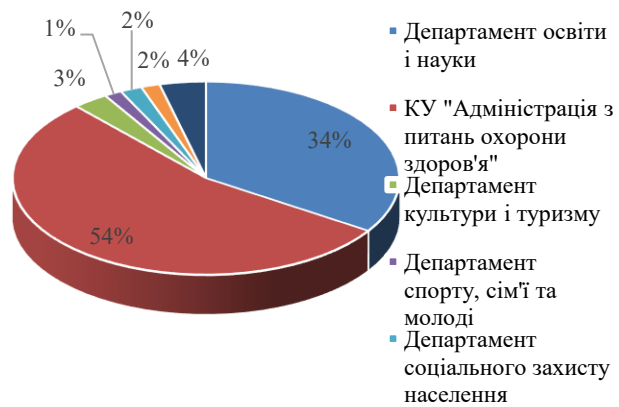


Рисунок 7. Частка споживання електричної енергії за 2023 рік, %

Споживання гарячої води

Відповідно до рішення міської ради від 27.07.2022 № 43 “Про врегулювання питань надання послуги з постачання гарячої води в місті Запоріжжі” [4] з жовтня 2022 року в місті припинено надання послуги з централізованого постачання гарячої води (рис. 8).

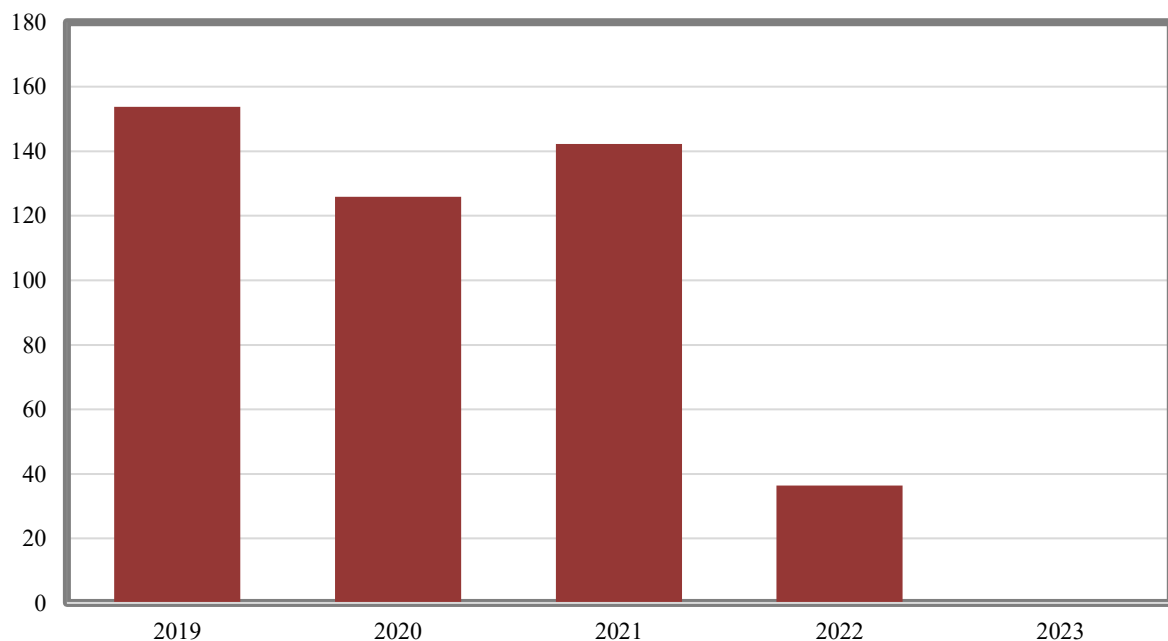


Рисунок 8. Динаміка споживання гарячої води у 2019–2023 рр., тис. м³

Споживання холодної води

Споживання холодної води у 2023 році зменшилось на 386,025 тис. м³ (43,6 %) в порівнянні з 2019 роком. В порівнянні з 2022 роком споживання зменшилося на 65,363 тис. м³ (11,6 %), рис. 9. Основними споживачами холодної води є заклади охорони здоров'я (61 %) та заклади освіти і науки (33 %), рис. 10.

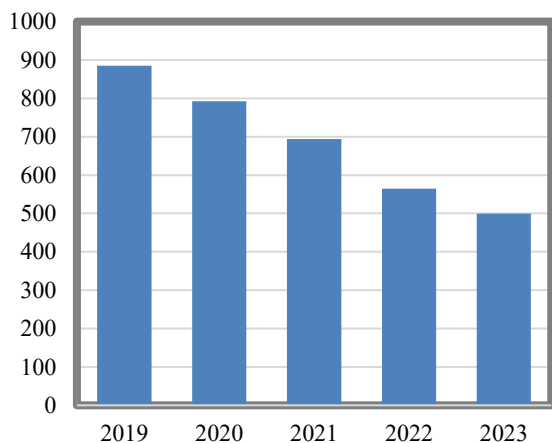


Рисунок 9. Динаміка споживання холодної води у 2019–2023 рр., тис. м³

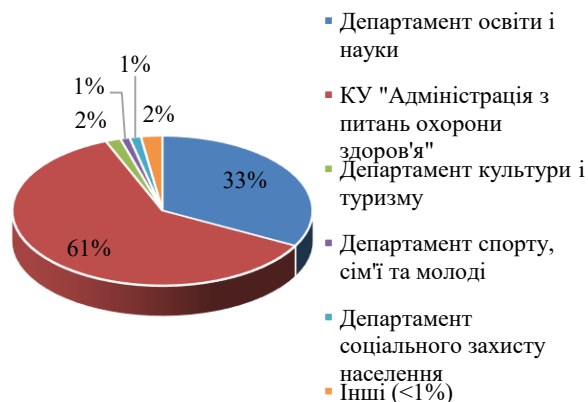


Рисунок 10. Частка споживання холодної води за 2023 рік, %

Висновки: Визначення пріоритетних секторів енергетичного планування в муніципалітетах є важливим етапом підвищення енергоефективності на місцевому рівні. Установлення чітких цілей і пріоритетів дозволяє оптимізувати використання енергетичних ресурсів, забезпечити ефективне управління енергоспоживанням та зменшити негативний вплив на довкілля. Важливими є сектори, що мають значний енергетичний потенціал для покращення: інфраструктура будівель, транспорт, вуличне освітлення та управління відходами, що потребують особливої уваги та модернізації.

Реалізація енергетичних планів на основі визначених пріоритетів, зокрема, на прикладі міста Запоріжжя показує ефективність автоматизованого енергомоніторингу в бюджетних установах. Це дозволяє своєчасно виявляти та усувати нераціональні витрати енергії, покращуючи енергоефективність та знижуючи витрати на енергопостачання. Завдяки чітким рекомендаціям Методики розроблення місцевих енергетичних планів та підтримці Держенергоефективності, муніципалітети мають можливість впроваджувати ефективні заходи для досягнення сталого розвитку та забезпечення екологічної безпеки на місцевому рівні.

Список використаних джерел

1. Наказ Міністерства розвитку громад, територій та інфраструктури України від 21 грудня 2024 року № 1163 "Про затвердження Методики розроблення місцевих енергетичних планів". URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0245-24#Text> (дата звернення 10.01.2025).
2. Програмний продукт енергомоніторингу UMUNI. URL: <https://www.umuni.com/> (дата звернення 15.01.2025).
3. Рішення міської ради від 16.04.2021 № 139 "Про закінчення опалювального періоду 2020–2021 років у місті Запоріжжя". URL: <https://zp.gov.ua/uk/documents/item/45579> (дата звернення 13.02.2025).
4. Рішення міської ради від 27.07.2022 № 43 "Про врегулювання питань надання послуги з постачання гарячої води в місті Запоріжжі". URL: <https://zp.gov.ua/uk/documents/item/50501> (дата звернення 14.02.2025).

References

1. Order of the Ministry of Development of Communities, Territories and Infrastructure of Ukraine dated December 21, 2024 No. 1163 “On Approval of the Methodology for Developing Local Energy Plans”. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0245-24#Text>. (accessed 01/10/2025) (Ukr).
2. UMUNI energy monitoring software product. URL: <https://www.umuni.com/>. (accessed 01/15/2025) (Ukr).
3. Resolution of the City Council dated April 16, 2021 No. 139 “On the End of the 2020–2021 Heating Period in the City of Zaporizhzhia”, URL: <https://zp.gov.ua/uk/documents/item/45579> (accessed 02/13/2025). (Ukr).
4. Decision of the City Council dated 07/27/2022 No. 43 “On the settlement of issues of providing hot water supply services in the city of Zaporizhzhia”, URL: <https://zp.gov.ua/uk/documents/item/50501> (accessed 02/14/2025). (Ukr).

УДК 621.311.62.19

Буряк А. Р., аспірантка, ORCID 0000-0001-7732-575X,
науковий керівник, д-р техн. наук, професор **В. В. Кирик**,
Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

АЛГОРИТМИ КЛАСТЕРИЗАЦІЇ В УПРАВЛІННІ ЕЛЕКТРИЧНИМИ МЕРЕЖАМИ

CLUSTERIZATION ALGORITHMS AND THEIR SIGNIFICANCE IN ELECTRICAL NETWORK MANAGEMENT

Анотація. У статті розглянуто основні методи кластеризації та їхнє використання в управлінні електроенергетичними мережами. Кластеризація є важливим методом аналізу даних, що дозволяє групувати параметри електромереж на основі схожих характеристик, сприяючи виявленню аномалій, прогнозуванню споживання та підвищенню ефективності роботи енергосистем.

В роботі проведено дослідження чотирьох основних методів: ієрархічна кластеризація, K-Means, DBSCAN та GMM (Gaussian Mixture Model). Ієрархічна кластеризація використовується для побудови дерева взаємозв'язків між кластерами, що дозволяє визначити структуру даних. K-Means ефективний для поділу вузлів мережі за рівнем споживання електроенергії, DBSCAN допомагає виявляти аномалії та кластери довільної форми, а GMM використовується для аналізу нестабільних режимів роботи мережі.

Результати досліджень показують, що застосування кластеризації в електроенергетиці покращує управління мережею, діагностику несправностей та безпеку експлуатації. Це сприяє оптимізації споживання електроенергії та зниженню ризиків аварійних ситуацій. Використання кластерного аналізу також дає змогу вдосконалити методи прогнозування та управління потоками електроенергії. Бібл. 7, рис. 1.

Ключові слова: кластеризація, електричні мережі, K-Means, DBSCAN, GMM, ієрархічна кластеризація, ймовірність.

Abstract. The article discusses the main clustering methods and their importance in power grid management. Clustering is an important data analysis method that allows grouping power grid parameters based on similar characteristics, helping to detect anomalies, predict consumption, and improve the efficiency of power systems.

Four main methods are analyzed: hierarchical clustering, K-Means, DBSCAN, and GMM (Gaussian Mixture Model). Hierarchical clustering is used to build a tree of relationships between clusters, which allows you to determine the structure of the data. K-Means is effective for dividing network nodes by the level of electricity consumption, DBSCAN helps to detect anomalies and clusters of arbitrary shape, and GMM is used to analyze unstable network operating modes.

Research results show that the use of clustering in the power industry improves network management, fault diagnosis, and operational safety. This helps optimize electricity consumption and reduce the risks of emergency situations. The use of cluster analysis also allows for improved methods of forecasting and managing electricity flows. Ref. 7, Fig. 1.

Keywords: clustering, electrical networks, K-Means, DBSCAN, GMM, hierarchical clustering.

Вступ. Кластеризація – один з сучасних методів аналізу даних, який широко використовується в різних галузях науки і техніки. Він дозволяє групувати об'єкти на основі певних спільних ознак і є особливо корисним при обробці великих обсягів даних [1]. Кластерний аналіз допомагає знаходити закономірності, виявляти аномалії та приймати обґрунтовані рішення на основі структурованої інформації.

Методи кластеризації можна розділити на кілька основних груп: ієрархічні, диз'юнктивні (наприклад, K-Means), щільності (DBSCAN) та імовірнісні. Кожен з цих методів має свої переваги та сфери застосування, залежно від характеру та структури даних. Останніми роками методи кластеризації все частіше використовуються в енергетиці. Зокрема, вони використовуються для аналізу параметрів енергосистеми, визначення режимів роботи обладнання, оптимізації управління енергосистемою та підвищення ефективності релейного захисту.

В енергосистемах кластеризація дозволяє виявити групи параметрів зі схожими характеристиками, що сприяє підвищенню стабільності та безпеки електропостачання. У роботі проведено дослідження основних методів кластеризації, їхні принципи роботи та потенційні можливості застосування в електроенергетиці. Особливу увагу приділено практичним аспектам аналізу параметрів енергосистеми та застосування кластеризації для визначення оптимальних рішень для покращення роботи енергосистеми.

Метою дослідження є узагальнення та аналіз основних методів кластеризації з дослідженням практичного застосування в електроенергетиці. Особливий акцент зроблено на можливості використання кластеризації для обробки режимних параметрів електричних мереж, визначення оптимальних режимів роботи обладнання та підвищення ефективності керування енергосистемами. Розглянуто як теоретичні основи методів кластеризації, так і їхня реалізація для розв'язання актуальних завдань у сфері енергетики.

Матеріал і результати дослідження. Кластеризація дозволяє згрупувати набір варіантів значень параметрів і вибрати найбільш оптимальну групу для конкретної задачі. Процес кластеризації в контексті електричної мережі може бути представлений як послідовність кроків (рис. 1).

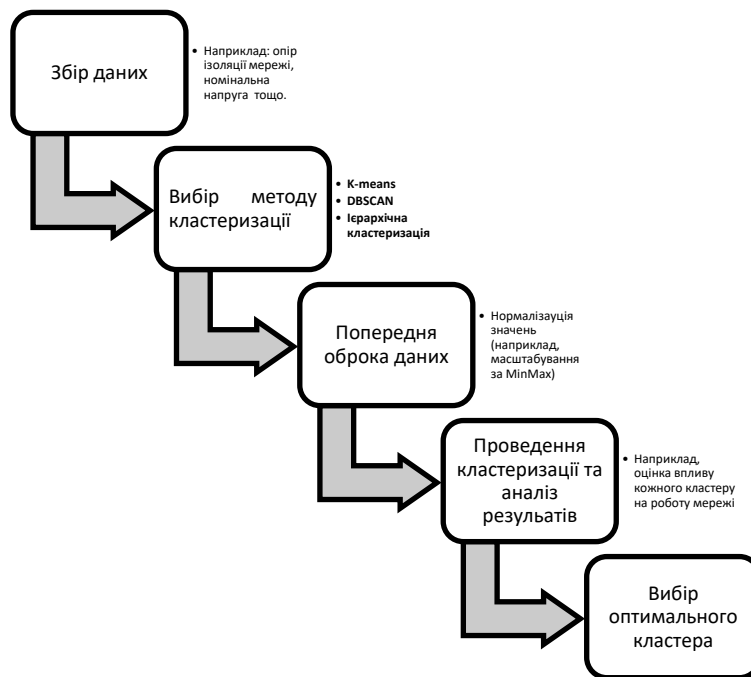


Рисунок 1. Алгоритм дії при виконанні кластеризації

Методи кластеризації можна поділити на кілька основних категорій залежно від підходу до групування даних. Розглянемо їх більш детально з точки зору застосування в електроенергетиці.

Ієрархічна кластеризація. Ієрархічні методи дозволяють будувати структуру вкладених кластерів, що важливо для аналізу складних взаємозв'язків у великих наборах даних.

Принцип дії полягає у тому що кожен об'єкт (наприклад, значення величини опору заземлення нейтралі) на початковому етапі розглядається як окремий кластер. В *агломеративному* методі найближчі кластери поступово об'єднуються до утворення одного великого кластера, що дозволяє простежити еволюцію групування параметрів [2]. У *дивізивному* методі процес починається із загального кластера, який поступово розбивається на менші, що дає можливість аналізувати структуру даних на різних рівнях деталізації. Використовуються різні метрики, зокрема евклідова відстань для кількох параметрів мережі, кореляційні коефіцієнти для аналізу взаємозв'язків між параметрами тощо. Також використовуються різні метрики, зокрема евклідова відстань для кількох параметрів мережі, кореляційні коефіцієнти для аналізу взаємозв'язків між параметрами тощо.

Перевагами для електричних систем є: можливість аналізу взаємозв'язків між параметрами на різних рівнях деталізації; відсутність необхідності визначити кількість кластерів; гнучкість у виборі метрики відповідно до конкретних даних. Недоліками є висока обчислювальна складність для великих наборів даних та чутливість до шумів у даних.

Розділові методи (K-Means). Метод K-Means є одним із найпопулярніших алгоритмів, які використовують для розподілу даних на групу K на основі середніх значень. У контексті електричних мереж цей

метод особливо корисний для сегментації режимів роботи та групування параметрів обладнання.

Визначається кількість кластерів K (наприклад, кількість типів режимів роботи електричної мережі). Ініціалізуються випадкові центроїди кластерів. Кожен об'єкт даних (наприклад, набір параметрів електричної мережі в певний момент часу) надається до найближчого центру. Обчислюються нові центроїди як середнє значення об'єктів у кластері [3]. Процес повторюється, поки центроїди не стабілізуються, що сприяє досягненню оптимального розподілу параметрів.

Основними перевагами для електричних систем є: простота реалізації та інтерпретації; висока швидкість роботи, що важливо для системи реального часу; ефективність при роботі з великими наборами даних.

Основними недоліками є: необхідність заздалегідь визначити кількість кластерів; чутливість до початкового вибору центроїдів; тенденція до створення кластерів сферної форми, що не завжди відповідає природі даних в електричних мережах.

Методи на основі щільності (DBSCAN). Метод DBSCAN (*Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise*) використовується для виявлення кластерів вільної форми та знаходження аномалій у даних. Цей вид особливо цінний для аналізу нестандартних режимів роботи електричних мереж та аварійних ситуацій.

Перш за все визначається параметр eps (радіус окружності) та $min_samples$ (мінімальна кількість сусідніх точок для створення кластера). Обирається випадкова точка, якщо вона має достатню кількість сусідів у межах радіуса eps , формується кластер. Кластері розширюються, поки не будуть знайдені всі точки в межах заданих параметрів, що дозволяє виявляти групи подібних режимів роботи. Об'єкти, які не входять до жодного кластера, позначаються як шумові значення або аномалії, які можуть вказувати на нещодавні режими роботи електричної мережі.

Переваги для електричних систем: здатність виявляти кластери вільної форми; ефективно визначення шумів та аномалій; не потребує попереднього визначення кількості кластерів [4].

Недоліки: чутливість до вибору параметрів eps та $min_samples$; складнощі при роботі з кластерами різної щільності; проблеми з кластеризацією багатовимірних даних.

Статистичні та ймовірнісні методи (GMM). *Gaussian Mixture Models* (GMM) базується на ймовірному підході до кластеризації, вважаючи, що кожен кластер має нормальний розподіл даних. Підхід дозволяє вивести невизначеність у параметрах цієї електричної мережі та моделювати ймовірні характеристики їх роботи.

Дані моделі діють як комбінація кількох нормальних розподілів, що відрізняються від різних режимів роботи електричної мережі. Використовується алгоритм очікувано-максимізаційного оцінювання (ЕМ), що ітеративно коригує параметри моделі для найкращого відповідності

даних. Кожен об'єкт отримує ймовірність належності кожному кластеру, а не жорстке володіння, що дозволяє моделювати перехідні режими роботи [5].

Переваги для електричних систем: можливість моделювання складних розподілів даних; достатня інтерпретованість з точки зору теорії ймовірностей.

Недоліки: висока обчислювальна складність; чутливість до початкової ініціалізації.

Методи на основі графів (Спектральна кластеризація). Цей метод використовує графове представлення даних для поділу точок на групи, що дозволяє ефективно моделювати топологію електричних мереж та взаємозв'язки між їх компонентами.

Початковою дією є побудова матриці подібності між точками даних, що відображає взаємозв'язки між параметрами електричної мережі. Виконується спектральне розкладання матриці для визначення найбільш значущих зв'язків та структурних особливостей мережі. Дані проєктуються в просторі з меншою розмірністю, що дозволяє виділити кластери та спрощує аналіз складних взаємозв'язків.

Переваги для електричних систем: ефективність при роботі з нелінійно розділеними даними; здатність виявляти складні структури взаємозв'язків; можливість інтеграції з топологічними моделями електричних мереж.

Недоліки: висока обчислювальна складність для великих мереж; чутливість до вибору типу та параметрів графу; складності в інтерпретації результатів.

Кластеризація відкриває широкі можливості для аналізу та оптимізації процесів в електричних системах. Нижче наведені основні напрямки застосування методів кластеризації з конкретними прикладами їх реалізації.

1. Аналіз режимів роботи електромереж – кластеризація дозволяє розробити типи режимів роботи підстанцій та ліній електропередавання, що сприяє оптимізації їх експлуатації та планування технічного обслуговування. Наприклад, аналіз добових графіків на Download за допомогою K-Means дозволяє виділити характерні патерни (схеми-образи) споживання електроенергії та адаптувати режими роботи обладнання відповідно до них.

2. Виявлення аномальних режимів та перевантажень – методи кластеризації на основі ідентифікації щільності, такі як DBSCAN [4], ефективно відмовляються від параметрів енергопостачання. Це дозволяє правильно виявляти якісь аварійні режими, перезавантажувати обладнання та інші новітні режими роботи. Наприклад, аналіз даних телеметрії з підстанцій за допомогою DBSCAN дозволяє виявити аномальні значення напруги та струму, які можуть свідчити про несправність обладнання.

3. Оптимізація налаштувань релейного захисту – кластеризація дозволяє підібрати оптимальні параметри для підвищення селективності захисту. Ієрархічна кластеризація дозволяє групувати подібні режими роботи та визначати для кожної групи найбільш ефективні налаштування релейного захисту, що завершує його чутливість та зменшує ймовірність хибних спрацювань.

4. Прогнозування споживання електроенергії – групування споживачів за характеристиками споживання за допомогою GMM дозволяє створити більш точні прогнозні моделі. Наприклад, аналіз даних про споживання електроенергії іншими категоріями споживачів дозволяє визначити типи патерни та сезонні зміни, що завершили точність прогнозування навантаження на електричну мережу.

5. Аналіз якості електроенергії – кластеризація за рівнем напруги, наявністю гармонік та іншими показниками якості електроенергії дозволяє виявити проблемні ділянки мережі та прийняти обґрунтоване рішення щодо їх модернізації. Наприклад, спектральна кластеризація дозволяє групувати точки мережі за подібністю спектрального складу напруги та виявляти джерела гармонічних спотворень.

Кластерний підхід в енергетиці передбачає об'єднання географічно локалізованих підприємств, пов'язаних технологічними зв'язками, з метою надання послуг з постачання енергії суб'єктам інноваційної діяльності. Діяльність таких кластерів орієнтована на впровадження нових енергоощадних технологій, модернізацію застарілого обладнання та використання альтернативних джерел енергії [6].

У дослідженні енергетичного ринку України було застосовано факторний аналіз, метод головних компонент та кластеризацію для моделювання процесів на ринку електроенергії. Це дозволило виявити основні переваги та недоліки в роботі галузі та спрогнозувати подальші дії для її розвитку [7].

Загалом, математична кластеризація в електроенергетиці сприяє підвищенню конкурентоспроможності економіки регіону, активізації бізнесу, нарощуванню інноваційно-технологічного потенціалу та поліпшенню інвестиційного клімату. Досвід функціонування кластерних утворень показує, що вони забезпечують значний поштовх в економічному зростанні тих регіонів, які застосовували кластерну стратегію розвитку.

Висновки. Методи кластеризації є потужним інструментом аналізу даних в електричних системах, що дозволяє підвищити ефективність управління електричними мережами, оптимізувати режими роботи обладнання та покращити якість електропостачання. Різноманітність методів кластеризації дозволяє вибрати найбільш підхідний підхід для вирішення конкретних завдань у залежності від характеру даних та поставлених цілей.

Практичне застосування математичних методів кластеризації в електроенергетиці охоплює широкий спектр завдань: від аналізу режимів роботи мережі до оптимізації параметрів заземлення нейтралі. Результати досліджень показують, що використання кластерного аналізу дозволяє значно підвищити ефективність рішень та забезпечити більш надійне та якісне електропостачання.

Подальший розвиток методів кластеризації та їх інтеграція з іншими методами аналізу даних відкриває нові перспективи для підвищення ефективності управління електричними мережами та впровадження інноваційних технологій в електроенергетиці.

Список використаних джерел

1. Волосяк Ю. В. Аналіз алгоритмів кластеризації для задач інтелектуального аналізу даних // Збірн. наук. праць Військ.інст. Київського нац. ун-у ім. Тараса Шевченка. – 2014. – Вип. 47. – С. 112–119. URL: https://journals.indexcopernicus.com/api/file/viewByFileId/1666587?utm_source=chatgpt.com (дата звернення 24.03.2025).
2. Гулак Д. В. Використання кластерного аналізу для дослідження українського ринку електроенергії // The Scientific Heritage. – Будапешт, 2017. – № 10 (10). – С. 23–26. URL: https://journals.indexcopernicus.com/api/file/viewByFileId/1666587?utm_source=chatgpt.com (дата звернення 24.03.2025).
3. Волошко А. В., Лутчин Т. М. Кластеризація графіків електричних навантажень з урахуванням варіації кута поліномів // Вісник Нац. ун-у “Львівська політехніка”. – 2010. – № 668. – С. 123–128. URL: https://ena.lpnu.ua/bitstreams/b0461fcb-eeb2-4e25-9685-9bbc15503676/download?utm_source=chatgpt (дата звернення 24.03.2025).
4. Гулак Д. В. Розвиток електроенергетичного ринку України на засадах регіональної кластеризації. – Черкаси: Черкаський державний технологічний університет, 2021. – 250 с. URL: https://www.researchgate.net/publication/355038816_ROZVITOK_ELEKTROENERGETICNOGO_RINKU_UKRAINI_NA_ZASADAH_REGIONALNOI_KLASTERIZACII (дата звернення 24.03.2025).
5. Ланде Д. В., Субач І. Ю. Візуалізація та аналіз мережових структур. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 198 с. URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/45722/1/NP_vizual_analiz_merez_struktur.pdf?utm_source=chatgpt.com (дата звернення 24.03.2025).
6. Миколюк О. А. Формування кластерних структур в умовах становлення енергетичної незалежності. Економічний аналіз. 2017. Т. 27, № 3. С. 56–61. URL: <https://www.econa.org.ua/index.php/econa/article/download/1384/1143> (дата звернення 24.03.2025).
7. Kushchenko O., Aleksieienko I. Analytical study of the energy market of Ukraine. Economic scope. 2024. URL: <https://doi.org/10.32782/2224-6282/189-12> (дата звернення 24.03.2025).

References

1. Volosyuk Yu. V. Analysis of clustering algorithms for data mining tasks // Collection of scientific works of the Military Institute of the Taras Shevchenko National University of Kyiv. – 2014. – issue 47. – pp. 112–119. URL: https://journals.indexcopernicus.com/api/file/viewByFileId/1666587?utm_source=chatgpt.com (accessed 24.03.2025). (Ukr).
2. Gulak D. V. Using cluster analysis to study the Ukrainian electricity market // The Scientific Heritage. – Budapest, 2017. – No. 10 (10). – pp. 23–26. URL: https://journals.indexcopernicus.com/api/file/viewByFileId/1666587?utm_source=chatgpt.com (accessed 24.03.2025). (Ukr).
3. Voloshko A. V., Lutchyn T. M. Clustering of electrical load graphs taking into account the variation of the angle of polynomials // Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic". – 2010. – No. 668. – pp. 123–128. URL: https://ena.lpnu.ua/bitstreams/b0461fcb-eeb2-4e25-9685-9bbc15503676/download?utm_source=chatgpt (accessed 24.03.2025). (Ukr).
4. Gulak D. V. Development of the electric power market of Ukraine on the basis of regional clustering. – Cherkasy: Cherkasy State Technological University, 2021. – 250 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/355038816_ROZVITOK_ELEKTROENERGETICNOGO_RINKU_UKRAINI_NA_ZASADAH_REGIONALNOI_KLASTERIZACII (accessed 24.03.2025). (Ukr).

5. Lande D. V., Subach I. Yu. Visualization and analysis of network structures. – Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2020. – 198 p. URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/45722/1/NP_vizual_analiz_merez_struktur.pdf?utm_source=chatgpt.com (accessed 24.03.2025). (Ukr).

6. Mykolyuk O. A. Formation of cluster structures in the conditions of energy independence. Economic Analysis. 2017. vol. 27, No. 3. pp. 56–61. URL: <https://www.econa.org.ua/index.php/econa/article/download/1384/1143> (accessed 24.03.2025). (Ukr).

7. Kushchenko O., Aleksieienko I. Analytical study of the energy market of Ukraine. Economic scope. 2024. URL: <https://doi.org/10.32782/2224-6282/189-12> (accessed 24.03.2025).

УДК 621.311

Кавун І. М., аспірант, ORCID 0009-0004-0785-4970,
науковий керівник: канд. техн. наук, доцент **А. І. Замулко**,
Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

ОЦІНЮВАННЯ РІВНЯ ЦИФРОВІЗАЦІЇ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ОБ’ЄКТІВ

ASSESSMENT OF THE LEVEL OF DIGITALIZATION OF ENERGY FACILITIES

Анотація. Розглянуто методи оцінювання цифровізації енергетичних об’єктів, що дозволяють ефективно визначати рівень готовності енергетичних систем до впровадження цифрових технологій. Аналізуються основні підходи до оцінки, серед яких методи технічної, економічної, соціально-екологічної оцінки, а також методи на основі великих даних. Особливу увагу приділено визначенню можливостей для подальшого вдосконалення енергетичних систем за допомогою цифрових технологій. Визначено важливість комплексного підходу до оцінки, що дозволяє підвищити ефективність функціонування енергетичних об’єктів, знижуючи витрати і підвищуючи надійність. Бібл. 5.

Ключові слова: цифровізація, управління, цифровізаційні процеси, методи, оцінювання, інтелектуальні мережі, моніторинг, цифрова інфраструктура.

Abstract. The article considers methods for assessing the digitalization of energy facilities, which allow effectively determining the level of readiness of energy systems for the implementation of digital technologies. The main approaches to assessment are analyzed, including methods of technical, economic, socio-ecological assessment, as well as methods based on big data. Special attention is paid to identifying opportunities for further improvement of energy systems using digital technologies. The importance of an integrated approach to assessment is determined, which allows increasing the efficiency of the functioning of energy facilities, reducing costs and increasing reliability. Ref. 5.

Keywords: digitalization, management, digitalization processes, methods, evaluation, intelligent networks, digital infrastructure.

Вступ. Цифровізація енергетичних об’єктів стає важливим етапом трансформації енергетичної галузі, оскільки дозволяє значно підвищити ефективність управління енергетичними процесами, оптимізувати

виробництво та споживання енергії, знизити витрати, а також забезпечити стійкість енергетичних систем. Враховуючи, що цифрові технології в енергетичній сфері розвиваються та поступово впроваджуються, необхідно мати чіткі та ефективні методи оцінки рівня цифровізації енергетичних об'єктів. Оцінка рівня цифровізації енергетичних об'єктів дозволить визначити подальші кроки з впровадження цифрових рішень, а також ефективність їх впровадження та вчасне коригування стратегії для досягнення бажаних результатів [1–3].

Головною метою є оцінка поточного стану цифровізації об'єктів енергетики для формування плану розвитку/відновлення цифрової інфраструктури в енергетичній сфері.

Виклад основного матеріалу. Цифровізація енергетичних об'єктів охоплює інтеграцію інформаційно-комунікаційних технологій у процеси управління та експлуатації енергетичних підприємств, таких як генеруючі станції, розподільчі мережі, системи зберігання енергії, а також споживачі енергії. Цифровізація має бути комплексним процесом, який починається від оцінки поточного стану, закінчуючи складанням поетапного плану модернізації з визначенням відповідного рівня цифровізації.

Цифровізація охоплює такі аспекти як автоматизація управлінських процесів, застосування сенсорів та датчиків для моніторингу, використання отриманих даних та аналітики для прийняття рішень, а також впровадження технологій інтернету речей (IoT). Вищенаведені фактори впливають на рівень цифровізації об'єкта та його здатність до впровадження нових рішень. Рівень цифровізації – це сукупність обладнання та заходів, які реалізуються на об'єкті. Від рівня цифровізації залежить ефективність управління енергетичними процесами, а також здатність об'єкта адаптуватися до нових технологій та інновацій. Рівень цифровізації також визначає можливість об'єкта реагувати на навколишні зміни такі як стан мережі, оперативні переключення, зміна попиту на електроенергію, впровадження нових рішень тощо.

Оцінка цифровізації енергетичних об'єктів супроводжується декількома викликами. Одним з головних є відсутність єдиних стандартів і критеріїв оцінки цифрових технологій у галузі енергетики, що ускладнює порівняння та інтеграцію різних підходів. Крім того, існує технологічна складність, яка полягає в тому, що більшість підстанцій оснащено застарілими пристроями збору інформації або взагалі їх відсутністю, а також неможливістю отримати цифрові сигнали з наявного обладнання, що в свою чергу знижує рівень цифровізації. Однак процес оцінювання існуючого стану об'єктів енергетики (підстанцій) необхідний для формування подальших кроків з відновлення розвитку та модернізації систем розподілу та передачі електричної енергії.

Основні елементи оцінки цифровізації енергетичних об'єктів повинні охоплювати технічні аспекти (зокрема, аналіз наявної інфраструктури, її здатності інтегрувати новітні технології, а також ефективність їх використання); економічну оцінку (розрахунок витрат та вигод від

впровадження цифрових технологій); соціально-екологічну оцінку (визначення впливу цифровізації на довкілля та суспільство); управлінську оцінку (процеси управління змінами, адаптація персоналу до нових технологій та ефективність прийняття управлінських рішень); моніторинг і вдосконалення (оцінка цифровізації має передбачати постійний моніторинг та вдосконалення впроваджених технологій) [3–5].

Висновки. Оцінка рівня цифровізації дозволяє виявити сильні і слабкі сторони енергетичних об'єктів, визначити ефективність впроваджених технологій та спрогнозувати майбутні вигоди. Застосування комплексного підходу до оцінки цифровізації, що включає технічну, економічну та соціально-екологічну складові, дозволяє досягти максимальних результатів у підвищенні ефективності та надійності енергетичних систем. Однак для подолання існуючих труднощів необхідно розробити єдині стандарти та критерії для оцінки цифрових трансформацій в енергетичному секторі, що стане основою для подальших успіхів у цій сфері.

Список використаних джерел

1. Цифрові технології в інноваційній трансформації економіки України. Єгоров І. Ю., Никифоров О. І. та ін. URL: <http://ief.org.ua/docs/mg/321.pdf> (дата звернення 24.03.2025).
2. Організаційно-економічні детермінанти розвитку цифрової енергетики в Україні. Тімченко О. М., Небрат В. В., Ліп В. Е., Биконя О. С., Дубас Ю. В., 2019. URL: https://eip.org.ua/docs/EP_19_3_78_uk.pdf (дата звернення 24.03.2025).
3. Цифрова трансформація в електроенергетиці. Ігор Блінов, Сергій Денисюк. URL: <https://cigre.org.ua/wp-content/uploads/2023/11/Блінов-Денисюк-доповідь-СІГРЕ-3.pdf> (дата звернення 24.03.2025).
4. Особливості вимірювання процесів цифровізації в контексті цілей економічного відновлення: фінансовий аспект. Євген Буряк, Катерина Редько, Світлана Сирцева, Олена Шуплат. URL: <https://zenodo.org/records/7290459> (дата звернення 31.03.2025).
5. Реалізація стратегії розвитку цифровізації економіки України в умовах індустрії 4.0: міжнародний досвід країн ЄС URL: <https://doi.org/10.20535/2307-5651.21.2022.254838> (дата звернення 31.03.2025).

References

1. Digital technologies in the innovative transformation of the economy of Ukraine. Yegorov I. Yu., Nykyforuk O. I. et al. URL: <http://ief.org.ua/docs/mg/321.pdf> (accessed 31.03.2025). (Ukr).
2. Organizational and economic determinants of the development of digital energy in Ukraine Timchenko O. M., Nebrat V. V., Lear V. E., Bykonya O. S., Dubas Y. V., 2019. URL: https://eip.org.ua/docs/EP_19_3_78_uk.pdf. (accessed 31.03.2025) (Ukr).
3. Digital Transformation in the Electric Power Industry Igor Blinov and Serhiy Denisyuk URL: <https://cigre.org.ua/wp-content/uploads/2023/11/Блинов-Денисюк-доповідь-СІГРЕ-3.pdf> (accessed 31.03.2025). (Ukr).
4. Peculiarities of measuring digitalization processes in the context of economic recovery goals: financial aspect Buryak Yevhen, Redko Kateryna, Syrtseva Svitlana, Shuplat Olena. URL: <https://zenodo.org/records/7290459> (accessed 31.03.2025). (Ukr).
5. Implementation of the strategy for the development of digitalization of the Ukrainian economy in the context of Industry 4.0: international experience of EU countries. URL: <https://doi.org/10.20535/2307-5651.21.2022.254838> (accessed 31.03.2025). (Ukr).

Лунін М. М., аспірант, ORCID 0009-0006-6983-0805,
науковий керівник: д-р техн. наук, доцент В. Ф. Находов,
Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

ПОБУДОВА СИСТЕМИ ЕНЕРГЕТИЧНОГО МОНІТОРИНГУ БУДІВЕЛЬ БЮДЖЕТНОЇ СФЕРИ

BUILDING AN ENERGY MONITORING SYSTEM FOR PUBLIC SECTOR BUILDINGS

Анотація. Побудова системи енергетичного моніторингу будівель бюджетної сфери є важливим етапом на шляху підвищення ефективності використання ними паливно-енергетичних ресурсів (ПЕР). Використання сучасних цифрових технологій для моніторингу використання ПЕР сприятиме оперативному виявленню неефективного використання енергетичних ресурсів, зниженню нераціональних їх витрат та втрат а також покращенню екологічних показників. У контексті інтеграції України до Європейського Союзу та досягнення цілей сталого розвитку, побудова системи енергомоніторингу, зокрема у бюджетній сфері, може стати важливим інструментом для виконання міжнародних зобов'язань у напрямку підвищення енергоефективності та забезпечення сталого розвитку. Однак, станом на сьогодні, в Україні не створені методичні основи та підходи до побудови системи моніторингу споживання та ефективності використання ПЕР будівлями бюджетної сфери. Системи енергетичного моніторингу, якими переважно користуються державні установи, були розроблені без належного наукового супроводження. Тому, проблема створення подібних систем вимагає детального дослідження та аналізу. Бібл. 3, рис. 1.

Ключові слова: енергоефективність, моніторинг, паливно-енергетичні ресурси, енергоменеджмент.

Abstract. Building an energy monitoring system for public sector buildings is an important step towards improving the efficiency of their use of fuel and energy resources (FER). The use of modern digital technologies to monitor the use of FERs will help to promptly identify inefficient use of energy resources, reduce irrational costs and losses, and improve environmental performance. In the context of Ukraine's integration into the European Union and achievement of sustainable development goals, building an energy monitoring system, particularly in the public sector, can be an important tool for fulfilling international commitments to improve energy efficiency and ensure sustainable development. However, as of today, Ukraine has not created methodological foundations and approaches to building a system for monitoring the consumption and efficiency of FER use by public sector buildings. Energy monitoring systems, which are mainly used by public institutions, were developed without proper scientific support. Therefore, the problem of creating such systems requires detailed research and analysis. Ref. 3, Fig. 1.

Keywords: energy efficiency, monitoring, fuel and energy resources, energy management.

Вступ. У сучасному світі моніторинг використання паливно-енергетичних ресурсів є невід'ємною складовою загальної системи менеджменту місцевого самоврядування. Контроль ефективності використання таких ресурсів багато в чому визначає стійкість та темпи

розвитку країни. В умовах повномасштабного вторгнення Росії на територію України перед територіальними громадами ще гостріше постала проблема вирішення важливих питань, пов'язаних зі споживанням паливно-енергетичних ресурсів, обліком та контролем витрат енергоносіїв, запровадженням заходів із підвищення рівня енергетичної ефективності та використанням потенціалу енергозбереження в умовах обмеженості ресурсів [1]. Це призвело до широкого впровадження в громадах систем енергетичного моніторингу, які розроблені приватними компаніями, що надають послуги з моніторингу використання ПЕР. Однак, в чинному законодавстві держави відсутні чітко визначені вимоги до функціонування системи енергетичного моніторингу, що в свою чергу може призвести до:

- невідповідності впроваджених систем національним та міжнародним стандартам;
- неможливості застосування єдиних, універсальних підходів до аналізу результатів, отриманих від існуючих навіть на однотипних систем енергомоніторингу.

Це, в свою чергу, веде до труднощів, а часто і неможливості адекватної, об'єктивної оцінки ефективності використання енергетичних ресурсів, зокрема, будівлями бюджетної сфери. Тому, необхідно розробити універсальну методологію побудови системи моніторингу використання ПЕР такими будівлями. Це дозволить, в майбутньому, створити національну систему моніторингу відповідно до вимог Закону України “Про енергетичну ефективність” та привести уже існуючі системи енергомоніторингу до спільних стандартів, що забезпечить їхню інтеграцію та уніфікацію в майбутні системи. Такий підхід дасть змогу створити єдину платформу для збору та аналізу даних про енергоспоживання а також для управління ефективністю використання ПЕР, в тому числі, будівлями бюджетної сфери. Впровадження такої системи енергетичного моніторингу дозволить енергоменеджерам аналізувати та приймати рішення щодо скорочення споживання паливно-енергетичних ресурсів, що в свою чергу дозволить зменшити навантаження на місцевий бюджет. У 90 % громад, розрахунок обсягу асигнувань враховує не реальні теплові потреби будівель, а спирається на витрати попередніх періодів у натуральних показниках. Частка видатків на енергоносії в бюджетах громад становить від 1,1 % до 12,9 % (в середньому близько 7 %, або 250 грн/м² громадських будівель на рік станом на 2021 рік) [2]. Ці значні суми можуть бути зменшені у разі моніторингу споживання та ефективності використання паливно-енергетичних ресурсів об'єктом.

Досягненню цієї мети сприятиме розроблення нормативно-правової та методичної бази, яка буде регламентувати впровадження та функціонування таких систем, а також сприятиме дотриманню вимог енергоефективності на загальнодержавному рівні. Результатом стане оптимізація витрат на енергоресурси, зменшення навантаження на екосистему та забезпечення сталого розвитку країни.

Таким чином, **метою** цього дослідження є створення методичних основ та підходів до побудови системи моніторингу споживання та ефективності використання паливно-енергетичних ресурсів будівлями бюджетної сфери.

При цьому **об'єктом** дослідження є енергоспоживання будівель бюджетної сфери а **предметом** дослідження — відповідно, методи моніторингу та аналізу споживання та ефективності використання енергетичних ресурсів в таких будівлях.

Матеріал і результати досліджень. Створення методичних основ побудови системи моніторингу споживання та ефективності використання ПЕР будівлями бюджетної сфери необхідно розглядати як комплексне питання, яке вимагає вирішення таких задач:

- розвиток методів класифікації та групування будівель за попередньо встановленими критеріями;
- удосконалення методів математичного моделювання споживання паливно енергетичних ресурсів будівлями;
- визначення напрямків, змісту та методології аналізу енергоспоживання та енергоефективності будівель.

Класифікація будівель та споруд бюджетної сфери має здійснюватися за наступними критеріями:

1. За функціональним призначенням будівель [3].
2. За конструктивними особливостями будівель (матеріал огорожувальних конструкцій, площа, об'єм тощо).
3. За обсягом споживання паливно-енергетичних ресурсів.

Крім того, необхідно класифікувати будівлі за критеріями їх географічного розміщення, а також за наявністю/відсутністю впроваджених заходів з енергозбереження.

Класифікувавши будівлі за відповідними критеріями можна створити певні групи об'єктів (будівель та споруд), показники енергоспоживання яких які підлягали б релевантному порівнянню між собою, що дасть змогу виявляти нераціональні витрати паливно-енергетичних ресурсів та на основі цього приймати відповідні управлінські рішення з підвищення енергетичної ефективності будівель. Однак, просте порівняння обсягів споживання енергоресурсів, навіть, однакових за призначенням будівель та споруд не дозволяє об'єктивно оцінити рівень ефективності використання ПЕР ними, оскільки ці будівлі можуть знаходитись в різних “зовнішніх” (кліматичних) умовах. Тому в процесі створення і функціонування систем енергетичного моніторингу необхідно будувати математичні моделі споживання ПЕР будівлями. Це необхідно для врахування впливу різних чинників на обсяги споживання енергоресурсів, для прогнозування потреби будівель у паливі та енергії на відповідну перспективу а також для періодичного (оперативного) контролю ефективності використання ПЕР будівлями, який здійснюється шляхом порівняння результатів моделювання, які базуються на розрахункових даних з фактичним енергоспоживанням.

Одним із основних завдань енергоменеджера є визначення класу енергоефективності будівлі та показників її питомого енергоспоживання.

Отже, система енергетичного моніторингу повинна надавати відповідну інформацію для подальших розрахунків таких параметрів. Тому, на основі даних про споживання будівлею ПЕР, порівняння її з розрахунковою моделлю, система має класифікувати об'єкти за рівнем ефективності використання енергетичних ресурсів. Такий порівняльний аналіз може здійснюватись, зокрема, з застосуванням методів бенчмаркінгу і дозволить створити кластери будівель, які разом з математичними моделями та попередньо сформованою класифікацією будівель та споруд бюджетної сфери дозволять створити енергетичну мапу цих об'єктів. З точки зору виконання функції оперативного контролю енергоефективності система моніторингу споживання паливно-енергетичних ресурсів будівлями може базуватися, зокрема, на використанні методів побудови так званих систем контролю і планування енергоспоживання (систем КіП), відомих у зарубіжній літературі під назвою Monitoring and Targeting Systems [4]. У системах КіП рівень ефективності використання палива чи енергії на будь-якому об'єкті визначається шляхом порівняння фактичних обсягів споживання відповідного енергоресурсу з так званими цільовими змінними енергоспоживання [4].

У зарубіжній практиці цільові змінні енергоспоживання для будь-яких об'єктів контролю ефективності використання ПЕР здебільшого встановлюють на основі спрощених математичних моделей, наприклад однофакторних лінійних рівнянь регресії. Інколи для цієї мети застосовують більш складні, багатфакторні математичні моделі, однак при цьому рекомендується включати до таких моделей невелику кількість (не більше трьох) незалежних змінних, тим часом як на споживання паливно-енергетичних ресурсів будівлями впливає значно більше чинників. Тому, в процесі створення і функціонування систем енергетичного моніторингу існує потреба використання більш складних математичних моделей енергоспоживання як з точки зору структури таких моделей, так і з точки зору можливості врахування в них достатньо великої кількості чинників, що впливають на споживання ПЕР в будівлях. Класифікація та групування будівель за попередньо встановленими критеріями дозволить обирати чинники, які будуть найбільше впливати на споживання ПЕР будівлями.

Хоча системи контролю та планування енергоспоживання застосовуються, переважно, для об'єктів промисловості, на основі методів побудови систем КіП цілком можливо створити подібну систему, що буде застосовуватися у системі моніторингу та ефективності використання ПЕР будівлями та спорудами бюджетної сфери. Система має аналізувати енерговикористання будівель за попередньо обраними та встановленими відповідно до завдання чинниками та формувати оцінку об'єктів за рівнем ефективності використання ПЕР.

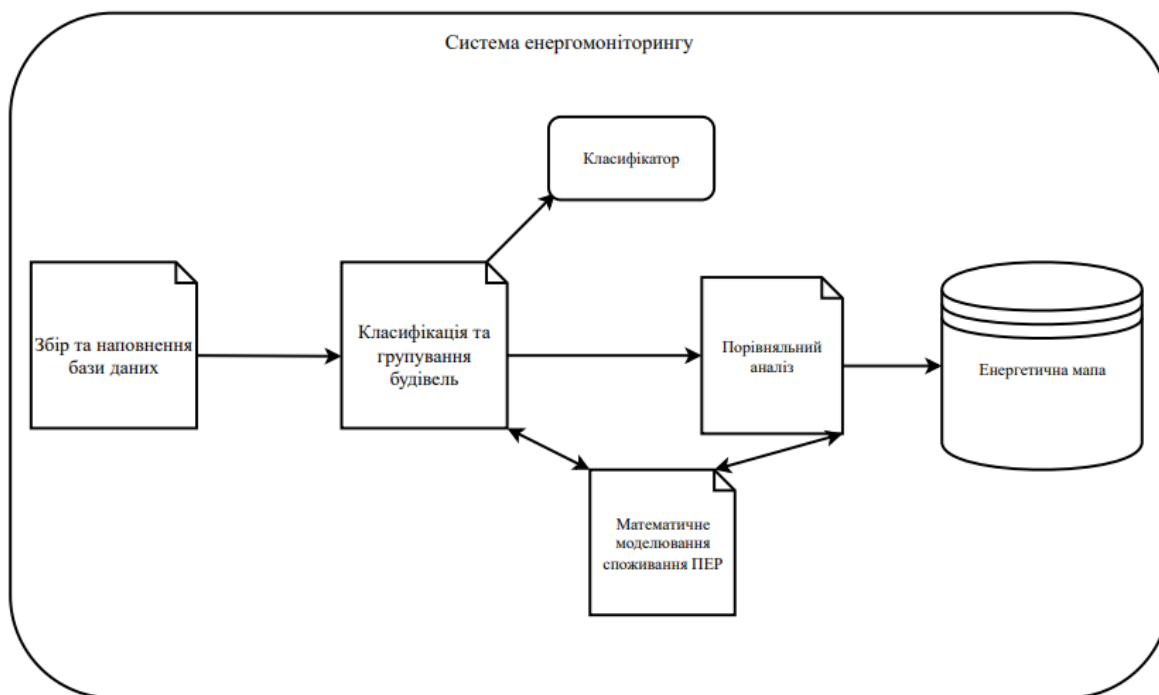


Рисунок 1. Основні функції системи моніторингу споживання та ефективності використання ПЕР будівлями бюджетної сфери

Висновки. Створення методичних основ та підходів до побудови системи моніторингу споживання та ефективності використання паливно-енергетичних ресурсів будівлями бюджетної сфери дозволить розробити цілісну та стандартизовану методологію побудови та функціонування систем енергомоніторингу, що буде відповідати всім необхідним критеріям та створить єдину платформу для збору та аналізу даних про енергоспоживання, а також для управління ефективністю використання ПЕР в бюджетній сфері.

Список використаних джерел

1. Алгоритм дій органів місцевого самоврядування по впровадженню системи енергетичного менеджменту [Електронний ресурс] // Проєкт USAID “Підвищення ефективності роботи і підзвітності органів місцевого самоврядування” (“ГОВЕРЛА”) hoverla.org.ua. – 2022. URL: <https://decentralization.gov.ua/> (дата звернення 05.03.2025).
2. Дослідження енергетичних бюджетів українських громад. URL: https://enefcities.org.ua/upload/files/Publications/Analytics/20_12_фінал.pdf (дата звернення 12.03.2025).
3. Державний класифікатор України. Державний класифікатор будівель та споруд ДК 018 – 2000 Видання офіційне. URL: https://www.ukrstat.gov.ua/klasf/st_kls/dkbs.pdf (дата звернення 06.03.2025).
4. Находов В. Ф., Бориченко О. В., Іванько Д. О. Контроль ефективності енерговикористання в системі енергетичного менеджменту // Вісник КНУТД. – 2013. – № 6 (74). – С. 67–77.

References

1. Algorithm of actions of local governments to implement the energy management system [Electronic resource] // USAID Project ‘Improving the Performance and Accountability of Local Governments’ (Hoverla) hoverla.org.ua. – 2022. URL: <https://decentralization.gov.ua/> (accessed 05.03.2025). (Ukr).

2. Study of energy budgets of Ukrainian communities. URL: https://enefcities.org.ua/upload/files/Publications/Analytics/20_12_фінал.pdf (accessed 12.03.2025).

3. State classifier of Ukraine. State classifier of buildings and structures DK 018 – 2000 Official edition. URL: https://www.ukrstat.gov.ua/klasf/st_kls/dkbs.pdf (accessed 06.03.2025). (Ukr).

4. Nakhodov V. F., Borychenko O. V., Ivanko D. O. Control of energy efficiency in the energy management system // KNUTD Bulletin. 2013. – No. 6 (74). – pp. 67–77. (Ukr).

УДК 621.316.7

Vitalii Karnaukh, PhD student, ORCID 0009-0007-3204-3901, scientific supervisor: Cand. Sc. (PhD), Associate Professor **Anatolii Marchenko**, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

ANALYSIS OF ELECTRIC POWER QUALITY ISSUES IN THE POWER GRID WITH DISTRIBUTED GENERATION

АНАЛІЗ ПРОБЛЕМ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В МЕРЕЖІ З РОЗПОДІЛЕНОЮ ГЕНЕРАЦІЄЮ

Abstract. Growing interest in Distributed Generation (DG) worldwide requires more detailed overview of electrical grid operation with high penetration of decentralized sources of energy under different conditions. Although the most widely used DG sources (Wind power plants and PV solar plants) have many economical, technical and ecological advantages, there are still some difficulties in integrating them into existing electrical power grid. This article gives a comprehensive overview of impacts that renewable energy sources can have on electric power stability and quality. Main advantages and possible issues of utilizing DG into electrical distribution system are analyzed. Ref. 6, Fig. 1.

Key words: Distributed generation, renewable sources of energy, electric power quality, impact.

Анотація. Зростаючий у всьому світі інтерес до розподіленої генерації (РГ) вимагає більш детального огляду роботи електричної мережі з високим рівнем інтеграції децентралізованих джерел енергії в різних умовах. Незважаючи на те, що найбільш широко використовувані джерела РГ (вітрові електростанції та фотоелектричні сонячні станції) мають багато економічних, технічних та екологічних переваг, все ще існують деякі труднощі з їх запровадженням в існуючу електричну мережу. Ця стаття містить вичерпний огляд впливу відновлюваних джерел енергії на стабільність і якість електроенергії. Проаналізовано основні переваги та можливі проблеми використання РГ в системі розподілу електроенергії. Бібл. 6, рис. 1.

Ключові слова: розподілена генерація, відновлювані джерела енергії, якість електроенергії, вплив.

Introduction. Along with “Affordable and clean energy” strategy of the United Nation plan “17 Sustainable Development Goals”, Ukraine faced tremendous deficit of electrical power due to military invasion. As most of electrical heat power plants are now destroyed, the more and more DG projects are currently being implemented (around 650 MW of green energy sources was installed in 2022–2023 years, and more than 500 MW of solar power was

connected in the year 2024). In order to achieve reliable and stable operation of electric power system, appropriate analysis of DG impact should be done.

The purpose and tasks of research. The main goal of research is to review all aspects of DG sources integration into electrical power system and analyze critical issues that can happen in different operational conditions. The following tasks was set in accordance with the research purpose:

- review of perspectives and advantages of DG utilizing in the power grid;
- analysis of negative impacts of renewable energy on the electric power quality;
- proposing possible solutions to optimize the operation of electric power system with high penetration of renewable sources of energy.

Material and research results. Renewable energy sources (RES) integrated in electric power grid give the following advantages [1–3]: power quality improvement, reduction of power losses, electric power stability increasing, operational flexibility, independence from fossil fuel, reduction of green-house gasses emission

On the other side, utilizing of RES can lead to the following power quality issues:

1. Voltage sag/swell.

Taking into account variable and uncontrollable nature of wind and solar energy, there can be fast sag or swell in output generation power value, which leads to increasing/decreasing of power losses in the transmission lines from alternative energy source to compensate difference between load and generation. Even if DG sources control voltage level in its own bus by reactive power regulating, energy consumers around can still have lack of voltage regulation ability.

2. Voltage level under/over nominal value.

Traditional centralized power grid structure was constructed based on one way energy transfer and transformation with all the electrical equipment and its parameters being selected and set to meet traditional energy flow. Implementation of RES into the distribution grid close to consumers will decrease power losses and rise voltage level of distribution grid buses, which requires reconfiguration and electrical grid equipment parameters adapted.

3. Voltage harmonics.

Most of RES are connected to the electrical grid via frequency converters which consist of diodes and transistors that generate harmonic distortion of current due to functional features of its electronic schemes. Large number of harmonics can lead to communication issues, equipment overheating, increased line losses and false circuit breaker tripping [4].

Figure 1 shows the influence of the harmonics on the main signal.

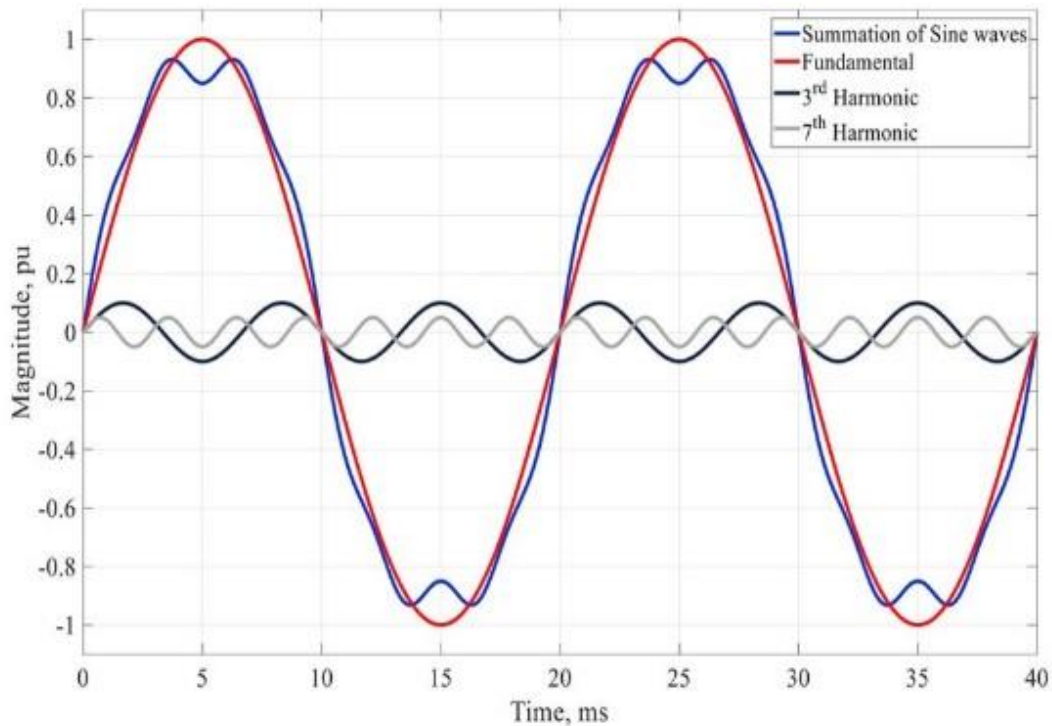


Figure 1. Harmonic distortion

4. Voltage fluctuations and flicker.

Small voltage fluctuations of around 5 % from nominal value with low frequency (6-10 Hz) is usually caused by dynamic character of powerful load in the weak electrical grid and visually can be seen as lamp flickering without direct damage to electrical equipment. As RES have dynamic generation character, voltage flicker effect can be increased inside the electrical grid depending on the power output of DG source [4].

5. Electrical losses increasing.

Transmission and distribution technical losses of electric power system with DG depend on energy source output power, its location, power factor and grid structure. In some cases, DG source utilization can increase power losses [5].

6. Increased wearing of voltage regulating equipment.

Variable nature of RES results in frequent power output variations which requires voltage regulating devices to switch more often. As a result, decreasing of life time of transformers OLTC mechanism and Static Capacitor Bank commutation device can take place [2].

The following technics are proposed to solve the above-mentioned problems:

- utilizing of Energy storage systems (ESS) to compensate stochastic nature of RES (for example chemical batteries, flywheels, compressed air technologies, fuel cells, supercapacitors, SMES) [4];
- installation of Static Synchronous Compensator (STATCOM) and Thyristor-controlled series compensation (TCSC) to cope with voltage quality issues [1, 6];

– distribution system reconfiguration can help reducing power losses and achieve better voltage profile [1].

Conclusions. Reviewed strategies and trends of renewable energy sector worldwide and in the Ukraine cause the necessity to make the question of DG sources implementation into electric power grid to be of high importance. Research includes detailed overview of negative consequences of RES integration, as well as analysis of modern technics to solve the electric energy quality issues in the grid with DG.

References

1. Razavi S.-E., Rahimi E., Javadi M. S., Nezhad A. E., Lotfi, M., Shafie-Khah M. and Catalão J. P. S. (2019) Impact of distributed generation on protection and voltage regulation of distribution systems: A review. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032119300668> (accessed 01.03.2025).
2. Yandulskyi, O. S., Trunina, H. O. and Nesterko, A. B. (2021) Voltage regulation in distribution electrical networks with renewable energy sources. Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute. URL: https://ae.fea.kpi.ua/ae-files/doc/Monogr_RegU-VDE.pdf (accessed 01.03.2025). (Ukr).
3. Rudresha S. J., Ankaliki S. G. and Ananthapadmanabha T. (2020) Impact of DG integration in distribution system on voltage stability and loss reduction for different loading conditions. URL: <https://www.ijrte.org/wp-content/uploads/papers/v8i5/E6164018520.pdf> (accessed 02.03.2025).
4. Hernández Mayoral E., Dueñas Reyes E., Iracheta Cortez R., Martínez Hernández C. J., Aguilar Gómez C. D., Jiménez Román C. R., Rodríguez Romero J. D., Rodríguez Rivera O., Mendoza Santos E. F., Durante Gómez W. and Barreto Muñoz J. I. (2022) Power quality in renewable energy microgrids applications with energy storage technologies issues, challenges and mitigations. In Electric Power Conversion and Micro-Grids. IntechOpen. URL: <https://www.intechopen.com/chapters/77485> (accessed 03.03.2025).
5. Nascimento P. H. M., Ávila O. F., de Oliveira L. E., Passos Filho J. A., Saraiva J. T. and Silva Junior I. C. (2019) Impact of distributed generation penetration on distribution network technical losses. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8916383> (accessed 03.03.2025).
6. Yandulskyi O. S., Marchenko A. A. and Hulyi V. S. (2016) Research of operation modes of the power system with a significant share of wind power plants. Visnyk of Vinnytsia Polytechnic Institute, 2(125), 122–127. URL: <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/1913> (accessed 04.03.2025). (Ukr).

Список використаних джерел

1. Razavi S.-E., Rahimi E., Javadi M. S., Nezhad A. E., Lotfi, M., Shafie-Khah M. and Catalão J. P. S. (2019) Impact of distributed generation on protection and voltage regulation of distribution systems: A review. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032119300668> (дата звернення 01.03.2025).
2. Яндульський О. С., Труніна Г. О., Нестерко А. Б. (2021) Регулювання напруги в розподільних електричних мережах з відновлюваними джерелами енергії. КПІ ім. Ігоря Сікорського. URL: https://ae.fea.kpi.ua/ae-files/doc/Monogr_RegU-VDE.pdf. (дата звернення 01.03.2025).
3. Rudresha S. J., Ankaliki S. G. and Ananthapadmanabha T. (2020) Impact of DG integration in distribution system on voltage stability and loss reduction for different loading

conditions. URL: <https://www.ijrte.org/wp-content/uploads/papers/v8i5/E6164018520.pdf> (дата звернення 02.03.2025).

4. Hernández Mayoral E., Dueñas Reyes E., Iracheta Cortez R., Martínez Hernández C. J., Aguilar Gómez C. D., Jiménez Román C. R., Rodríguez Romero J. D., Rodríguez Rivera O., Mendoza Santos E. F., Durante Gómez W. and Barreto Muñoz J. I. (2022) Power quality in renewable energy microgrids applications with energy storage technologies issues, challenges and mitigations. In Electric Power Conversion and Micro-Grids. IntechOpen. URL: <https://www.intechopen.com/chapters/77485> (дата звернення 03.03.2025).

5. Nascimento P. H. M., Ávila O. F., de Oliveira L. E., Passos Filho J. A., Saraiva J. T. and Silva Junior I. C. (2019) Impact of distributed generation penetration on distribution network technical losses. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8916383> (дата звернення 03.03.2025).

6. Яндульський О. С., Марченко А. А., Гулий В. С. (2016) Дослідження режимів роботи енергосистеми зі значною часткою вітрових електричних станцій. Вісник Вінницького політехнічного інституту 2(125), 122–127. URL: <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/1913> (дата звернення 04.03.2025).

УДК 621.31

Богойко І. І., аспірант, ORCID 0000-0002-6816-6352,
науковий керівник: д-р техн. наук, професор **С. П. Денисюк**,
Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

ОПТИМІЗАЦІЯ ЕНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТУ ЗАРЯДНИХ СТАНЦІЙ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ У РОЗОСЕРЕДЖЕНИХ ЕНЕРГОСИСТЕМАХ

OPTIMIZATION OF ENERGY MANAGEMENT FOR ELECTRIC VEHICLE CHARGING STATIONS IN DISTRIBUTED ENERGY SYSTEMS

Анотація. У роботі розглянуто оптимізацію енергоменеджменту зарядних станцій електромобілів у розосереджених енергосистемах. Проаналізовано сучасні методи оцінювання, моніторингу та оптимізації ефективності станцій, зокрема із залученням IoT-технологій, штучного інтелекту та двонаправленої комунікації V2G. Узагальнено підходи до підвищення гнучкості та енергоефективності за рахунок інтеграції відновлюваних джерел енергії й оптимізаційних алгоритмів. Окреслено економічні та екологічні переваги впровадження новітніх технологій, що сприяють сталому розвитку електротранспорту та енергетики. Бібл. 12, табл. 1.

Ключові слова: оптимізація енергоменеджменту, зарядні станції, електромобілі, розосереджені енергосистеми, IoT, V2G, штучний інтелект.

Abstract. The paper examines the optimization of energy management for electric vehicle charging stations in distributed energy systems. Current methods of evaluating, monitoring, and optimizing station performance are analyzed, including IoT-based technologies, artificial intelligence, and V2G bidirectional communication. Approaches to enhancing flexibility and energy efficiency through the integration of renewable sources and optimization algorithms are summarized. The economic and environmental benefits of implementing innovative technologies

are outlined, supporting sustainable development of e-mobility and the energy sector. Ref. 12, Tabl. 1.

Keywords: energy management optimization, charging stations, electric vehicles, distributed energy systems, IoT, V2G, artificial intelligence.

Вступ. Зі зростанням популярності електромобілів і розвитком мереж зарядних станцій виникає нагальна потреба у впровадженні сучасних систем енергетичного менеджменту [1]. Розосереджені системи енергоменеджменту забезпечують ефективну організацію роботи зарядних станцій, дозволяють управляти потоками електроенергії, інтегрувати відновлювані джерела та адаптуватися до змін у споживчій поведінці [2]. Ефективне управління такими системами має базуватися на комплексному підході, що включає оцінювання поточного стану, безперервний моніторинг і застосування алгоритмів оптимізації для забезпечення надійної роботи мережі в режимі реального часу.

Сучасні зарядні станції еволюціонували від простих пристроїв, які забезпечують електромобілі електроенергією, до складних енергетичних комплексів, інтегрованих у розумні мережі (Smart Grid). Швидкісні зарядні станції з потужністю до 350 кВт набувають особливої популярності, оскільки суттєво знижують час зарядки електро-мобіля [3]. Ці станції часто оснащуються додатковими системами зберігання енергії (енергонакопичувачами) та інтегрованими сонячними панелями, що сприяє їхній автономності, стабільності та зменшенню навантаження на центральні електромережі.

Важливою тенденцією є впровадження технології *Vehicle-to-Grid* (V2G) [4], яка забезпечує двонаправлений потік енергії між транспортним засобом та мережею. Електромобілі можуть використовуватися для забезпечення електричних навантажень у точках зарядки, а також для розосереджених систем накопичення енергії (BESS) з метою компенсації пікових навантажень. Додаткові елементи накопичення, інтегровані в мережу, можуть покращити резервну потужність та регулювання частоти, а також отримати вигоду від роботи мережі, продаючи електроенергію під час пікових годин. За останнє десятиліття цикл розряду акумуляторів значно покращився, що підвищило рентабельність впровадження технології V2G на ринку. У сценарії двонаправленого потоку енергії між навантаженням, електромобілями та електромережею ефективність ідеальної синхронізації та мінімізації втрат досягається шляхом встановлення каналів зв'язку та систем управління між кожним елементом.

Метою дослідження є аналіз, систематизація та оцінювання наявних методів моніторингу й оптимізації енергоспоживання зарядних станцій електромобілів у розосереджених енергосистемах на основі сучасних технологій (IoT, AI, V2G) з метою визначення найбільш ефективних підходів, що забезпечують підвищення енергоефективності, гнучкості та надійності систем, а також зменшують негативний вплив на довкілля і витрати на електроенергію.

Матеріал і результати досліджень. Оцінка ефективності зарядних станцій базується на різноманітних показниках, які дозволяють комплексно аналізувати їхню роботу. Енергетичні показники включають коефіцієнт використання енергії з відновлюваних джерел (*Renewable Energy Fraction – REF*) [5], коефіцієнт завантаження станцій та загальну ефективність процесу перетворення енергії. Крім енергетичних, активно застосовуються економічні показники, такі як вартість виробництва електроенергії (*LCOC – levelized cost of charging*) [6] та термін окупності (*ROI – Return on Investment*) [7]. Враховуються й екологічні аспекти, зокрема скорочення викидів вуглекислого газу в результаті інтеграції ВДЕ та оптимізації роботи станцій.

Моніторинг роботи зарядних станцій є невід’ємною частиною їхнього ефективного функціонування. Для цього активно застосовуються IoT-технології та датчики, які дозволяють в реальному часі відстежувати потужність, навантаження та рівень заряду акумуляторів [8]. Зібрані дані аналізуються спеціалізованими інформаційними платформами, такими як системи енергетичного менеджменту (*Energy Management Systems, EMS*), які оперативно реагують на зміни в роботі станцій та сприяють підтримці їх стабільності.

Оптимізація роботи зарядних станцій передбачає використання сучасних методів і технологій, серед яких ключову роль відіграє штучний інтелект. Нейронні мережі дозволяють прогнозувати попит на зарядку та генерацію енергії, що забезпечує оптимальне планування енергетичних потоків [9]. Також застосовуються методи лінійного програмування, що дозволяють ефективно розподіляти доступні ресурси між ВДЕ, акумуляторами та електромережами. Важливим елементом є і технології *Demand Response* [9], які керують навантаженням з метою зменшення пікових навантажень на електромережу, що підвищує загальну надійність системи.

На практиці процес оцінки та оптимізації ефективності зарядних станцій починається з визначення найбільш вагомих ключових показників, таких як коефіцієнт самоспоживання електроенергії та рівень використання енергії з ВДЕ. Наступним кроком є створення моделі моніторингу з використанням IoT-пристроїв, яка забезпечує збір та аналіз даних про роботу станції в режимі реального часу [10].

На основі отриманої інформації створюється цифрова модель, що дозволяє імітувати роботу станції та визначати оптимальні режими її функціонування. Впровадження прогнозних алгоритмів на основі штучного інтелекту допомагає зменшити використання електроенергії з традиційних джерел і збільшити частку споживання власної генерації, що суттєво впливає на економічні та екологічні характеристики станції.

Розумні енергомережі (*Smart Grids*) побудовані на трьох основних рівнях:

- рівні енергопотоків;
- рівні комунікації;
- рівні обчислень.

Наведені рівні працюють у взаємодії для балансування енергоспоживання та попиту, підвищуючи загальну ефективність системи [11]. Завдяки двонаправленій функціональності користувачі не лише споживають електроенергію, а й мають змогу продавати надлишки енергії комунальним компаніям. Щоб забезпечити цей процес, двонаправлена система комунікації контролює та регулює потоки енергії між користувачем і мережею, дозволяючи як виробникам, так і споживачам керувати енергетичними транзакціями в режимі реального часу. Крім того, ця технологія дає змогу постачальникам енергії дистанційно контролювати подачу електроенергії через інтернет-платформи, що підвищує гнучкість і адаптивність системи.

Комплексний підхід до оцінювання, моніторингу та оптимізації роботи розосереджених систем енергоменеджменту зарядних станцій електромобілів є ключем до досягнення високої ефективності та надійності мережі. Визначення KPI, використання сучасних IoT-технологій, аналітичних алгоритмів і методів машинного навчання дає змогу:

- постійно контролювати стан системи та оперативно реагувати на відхилення;
- забезпечувати оптимальний розподіл ресурсів, враховуючи як технічні, так і економічні аспекти;
- підвищувати рівень обслуговування кінцевих споживачів та знижувати витрати на експлуатацію.

Для ефективного аналізу та оптимізації роботи зарядних станцій електромобілів застосовуються різні методи оцінювання, моніторингу та оптимізації. У табл. 1 наведено основні підходи, їхні категорії, ключові аспекти та приклади реалізації, що дозволяють підвищити ефективність функціонування розосереджених енергосистем.

Таблиця 1. Методи оцінювання, моніторингу та оптимізації зарядних станцій

Метод	Категорія	Ключові аспекти	Приклади реалізації
KPI Analysis	Оцінювання	Визначення ключових показників (load factor, uptime, ефективність, витрати); простота вимірювань	Python (pandas, NumPy)
Statistical Analysis, Regression	Оцінювання	Аналіз трендів, прогнозування залежностей; глибокий аналіз, потребує великих обсягів даних	Python (scikit-learn, statsmodels)
IoT Data Collection	Моніторинг	Збір даних у реальному часі; оперативність, віддалений моніторинг; залежність від якості мережі	Python (paho-mqtt, requests), NoSQL (InfluxDB, MongoDB)
Anomaly Detection	Моніторинг	Виявлення відхилень та збоїв у роботі системи; своєчасне реагування, можлива хибна класифікація	Python (scikit-learn [Isolation Forest, DBSCAN], TensorFlow)

Закінчення таблиці 1

Метод	Категорія	Ключові аспекти	Приклади реалізації
Model Predictive Control (MPC)	Оптимізація	Прогнозування майбутніх навантажень, оптимізація рішень з урахуванням обмежень; високі обчислювальні витрати	Python (cvxpy, ruomo)
Genetic Algorithms	Оптимізація	Пошук глобального оптимуму через еволюційний підхід; ефективні при нелінійних задачах, потребують численних ітерацій	Python (DEAP, PyGAD)
Adaptive ML Algorithms	Оптимізація	Автоматичне самонавчання, адаптація до змін; потребують великого обсягу даних для високої точності	Python (TensorFlow, PyTorch, scikit-learn)
Economic Optimization Models	Оптимізація	Мінімізація експлуатаційних витрат, розрахунок ROI; інтеграція економічних показників	Python (cvxpy, ruomo)

Завдяки інтеграції відновлюваних джерел енергії та впровадженню сучасних алгоритмів управління, майбутнє зарядних станцій електромобілів виглядає перспективним і стійким [12]. Подальші дослідження та розвиток технологій дозволять досягти ще більш високої ефективності та забезпечити екологічно чисте енергозабезпечення транспортних засобів.

Зі зростанням темпів електрифікації транспорту архітектури наступного покоління мають забезпечувати автономну зарядку автопарків і впроваджувати передові обчислювальні технології з урахуванням захисту конфіденційності. Завдяки інтеграції технічних інновацій, соціально-економічних чинників і ретельної валідації, системи моніторингу стануть рушійною силою сталого розвитку мобільності.

Отже, сучасні системи енергоменеджменту повинні обробляти величезні обсяги інформації з різних джерел, що вимагає високої точності у вирівнюванні та синхронізації даних. Забезпечення захисту зібраної та проаналізованої інформації є ключовим аспектом при розгортанні розумних енергосистем. Збільшення кількості електромобілів і розвиток технологій вимагають постійної модернізації алгоритмів управління та впровадження інноваційних рішень, таких як штучний інтелект і розподілені обчислювальні платформи.

Висновки. Розвиток зарядних станцій електромобілів та їхня інтеграція з сучасними системами енергоменеджменту є одним з ключових напрямків сучасної енергетики. Використання комплексних методів оцінювання, моніторингу та оптимізації дозволяє значно підвищити їхню ефективність, зменшити витрати на електроенергію та знизити негативний вплив на довкілля, що забезпечує подальший сталий розвиток електротранспорту та енергетичних систем.

Список використаних джерел

1. Tejeida-Padilla R., Berdeja-Rocha E. M., Badillo-Piña I., Pérez-Matamoros Z., Amador-Santiago J. E. (2024) A Comprehensive Review of Electric Charging Stations with a Systemic Approach. *World Electric Vehicle Journal*, 15(12), 571. URL: <https://doi.org/10.3390/wevj15120571> (дата звернення 09.03.2025).
2. Mastoi M. S., Zhuang S., Munir H. M., Haris M., Hassan M., Usman M., Bukhari S. S. H. and Ro J.-S. (2022) An in-depth analysis of electric vehicle charging station infrastructure, policy implications, and future trends. *Energy Reports*, 8(2352-4847), 11504–11529. URL: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.09.011> (дата звернення 12.03.2025).
3. IEA (2023) Global EV Outlook 2023, IEA, Paris. URL: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023> (дата звернення 13.03.2025).
4. Mojumder M. R. H., Ahmed Antara F., Hasanuzzaman M., Alamri B. and Alshare, M. (2022) Electric Vehicle-to-Grid (V2G) Technologies: Impact on the Power Grid and Battery. *Sustainability*, 14(21), 13856. URL: <https://doi.org/10.3390/su142113856> (дата звернення 10.03.2025).
5. Khosravani A., Elaheh Safaei, Reynolds M., Kelly K. E. and Powell K. M. (2023) Challenges of reaching high renewable fractions in hybrid renewable energy systems. *Energy Reports*, 9, 1000–1017. URL: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.12.038> (дата звернення 09.03.2025).
6. Borlaug B., Salisbury S., Gerdes M. and Muratori M. (2020) Levelized Cost of Charging Electric Vehicles in the United States. *Joule*, 4(7), 1470–1485. URL: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.05.013> (дата звернення 13.03.2025).
7. Lee T., Yoon G., Kang B., Choi M., Park S., Park J. and Park S. (2024) Enhancing Electric Vehicle Charging Infrastructure: A Techno-Economic Analysis of Distributed Energy Resources and Local Grid Integration. *Buildings*, 14(8), 2546–2546. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings14082546> (дата звернення 11.03.2025).
8. Martins J. A. and Rodrigues J. M. F. (2025) Intelligent Monitoring Systems for Electric Vehicle Charging. *Applied Sciences*, 15(5), 2741. URL: <https://doi.org/10.3390/app15052741> (дата звернення 12.03.2025).
9. Siow Jat Shern, Md Tanjil Sarker, Ramasamy G., Siva Priya Thiagarajah, Fahmid Al Farid and Suganthi S. T. (2024) Artificial Intelligence-Based Electric Vehicle Smart Charging System in Malaysia. *World Electric Vehicle Journal*, 15(10), 440–440. URL: <https://doi.org/10.3390/wevj15100440> (дата звернення 09.03.2025).
10. Hofer P., Petrik D. and Herzwurm G. (2024) Enhancing EV Charging Stations Through IoT Platforms and Service Applications: An Analysis of the E-Mobility App Landscape, in: *Proceedings of the 2024 30th IEEE International Conference on Engineering Technology and Innovation*. URL: <https://doi.org/10.1109/ICEITI.2024.12345678> (дата звернення 13.03.2025).
11. Khan A. and Memon S. (2023) Investigating the impact of cyber security risks and reliability scenarios under the influence of IoT on the Smart Grid environment. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 18(2), 001-016. URL: <https://doi.org/10.30574/wjarr.2023.18.2.1234> (дата звернення 11.03.2025).
12. Ohanu C. P., Rufa, S. A. and Oluchi U. C. (2024) A comprehensive review of recent developments in smart grid through renewable energy resources integration. *Heliyon*, 10(3), e25705. URL: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25705> (дата звернення 12.03.2025).

References

1. Tejeida-Padilla R., Berdeja-Rocha E. M., Badillo-Piña I., Pérez-Matamoros Z., Amador-Santiago J. E. (2024) A Comprehensive Review of Electric Charging Stations with a Systemic Approach. *World Electric Vehicle Journal*, 15(12), 571. URL: <https://doi.org/10.3390/wevj15120571> (accessed 09.03.2025).

2. Mastoi M. S., Zhuang S., Munir H. M., Haris M., Hassan M., Usman M., Bukhari S. S. H. and Ro J.-S. (2022) An in-depth analysis of electric vehicle charging station infrastructure, policy implications, and future trends. *Energy Reports*, 8(2352-4847), 11504–11529. URL: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.09.011> (accessed 12.03.2025).
3. IEA (2023) Global EV Outlook 2023, IEA, Paris. URL: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023> (accessed 13.03.2025).
4. Mojumder M. R. H., Ahmed Antara F., Hasanuzzaman M., Alamri B. and Alshare, M. (2022) Electric Vehicle-to-Grid (V2G) Technologies: Impact on the Power Grid and Battery. *Sustainability*, 14(21), 13856. URL: <https://doi.org/10.3390/su142113856> (accessed 10.03.2025).
5. Khosravani A., Elaheh Safaei, Reynolds M., Kelly K. E. and Powell K. M. (2023) Challenges of reaching high renewable fractions in hybrid renewable energy systems. *Energy Reports*, 9, 1000–1017. URL: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.12.038> (accessed 09.03.2025).
6. Borlaug B., Salisbury S., Gerdes M. and Muratori M. (2020) Levelized Cost of Charging Electric Vehicles in the United States. *Joule*, 4(7), 1470–1485. URL: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.05.013> (accessed 13.03.2025).
7. Lee T., Yoon G., Kang B., Choi M., Park S., Park J. and Park S. (2024) Enhancing Electric Vehicle Charging Infrastructure: A Techno-Economic Analysis of Distributed Energy Resources and Local Grid Integration. *Buildings*, 14(8), 2546–2546. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings14082546> (accessed 11.03.2025).
8. Martins J. A. and Rodrigues J. M. F. (2025) Intelligent Monitoring Systems for Electric Vehicle Charging. *Applied Sciences*, 15(5), 2741. URL: <https://doi.org/10.3390/app15052741> (accessed 12.03.2025).
9. Siow Jat Shern, Md Tanjil Sarker, Ramasamy G., Siva Priya Thiagarajah, Fahmid Al Farid and Suganthi S. T. (2024) Artificial Intelligence-Based Electric Vehicle Smart Charging System in Malaysia. *World Electric Vehicle Journal*, 15(10), 440–440. URL: <https://doi.org/10.3390/wevj15100440> (accessed 09.03.2025).
10. Hofer P., Petrik D. and Herzwurm G. (2024) Enhancing EV Charging Stations Through IoT Platforms and Service Applications: An Analysis of the E-Mobility App Landscape, in: *Proceedings of the 2024 30th IEEE International Conference on Engineering Technology and Innovation*. URL: <https://doi.org/10.1109/ICEITI.2024.12345678> (accessed 13.03.2025).
11. Khan A. and Memon S. (2023) Investigating the impact of cyber security risks and reliability scenarios under the influence of IoT on the Smart Grid environment. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 18(2), 001-016. URL: <https://doi.org/10.30574/wjarr.2023.18.2.1234> (accessed 11.03.2025).
12. Ohanu C. P., Rufa, S. A. and Oluchi U. C. (2024) A comprehensive review of recent developments in smart grid through renewable energy resources integration. *Heliyon*, 10(3), e25705. URL: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25705> (accessed 12.03.2025).

Щербина Д. В., аспірант, ORCID 0009-0000-2956-4385,
науковий керівник: канд. техн. наук, доцент **Т. Л. Кацадзе**,
Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

МЕХАНІЧНІ НАКОПИЧУВАЧІ ЕНЕРГІЇ: АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ЗАСТОСУВАННЯ В ЕНЕРГОСИСТЕМАХ

MECHANICAL ENERGY STORAGE: TECHNOLOGY ANALYSIS AND APPLICATION IN POWER SYSTEMS

Анотація. У статті розглянуто сучасні механічні накопичувачі енергії, їхнє значення для стабілізації режимів енергетичних мереж та інтеграції відновлюваних джерел енергії. Детально проаналізовано основні типи механічних накопичувачів: гравітаційні системи, маховикові накопичувачі та пневматичні системи зберігання енергії. Визначено переваги та недоліки кожної технології, а також окреслено перспективи їх застосування. Наведено приклади реалізації механічних накопичувальних систем у світовій практиці. Бібл. 13, табл. 1.

Ключові слова: механічні накопичувачі енергії, гравітаційні накопичувачі, маховики, пневматичні накопичувачі, енергосистеми.

Abstract. The article examines modern mechanical energy storage systems, their significance for stabilizing energy grids and integrating renewable energy sources. The main types of mechanical storage systems are analyzed in detail: gravity-based systems, flywheel storage, and compressed air energy storage (CAES). The advantages and disadvantages of each technology are identified, and prospects for their application are outlined. Examples of the implementation of mechanical energy storage systems in global practice are provided. Ref. 13, Tabl. 1.

Keywords: mechanical energy storage, gravity storage, flywheels, compressed air storage, energy systems.

Вступ. У зв'язку з активним розвитком відновлюваної енергетики та зростанням частки джерел енергії негарантованої потужності, питання ефективного накопичення енергії набуває дедалі більшої актуальності. Одним із перспективних напрямів є механічні накопичувачі енергії, які забезпечують високу надійність та ефективність. Сучасні механічні системи накопичення енергії включають гравітаційні, маховикові та пневматичні технології, що дозволяють накопичувати та вивільняти енергію в масштабах, необхідних для балансування режимів енергосистем.

Зростаючий попит на ефективні рішення у сфері накопичення енергії спонукає до дослідження та вдосконалення механічних накопичувачів. Важливим аспектом є їхня адаптація до сучасних умов експлуатації, зокрема інтеграція в енергосистеми.

Метою дослідження є проведення аналізу відомих видів систем накопичення енергії зокрема механічних накопичувачів енергії, визначення їхніх ключових переваг та недоліки, а також оцінка перспективи їх сфер

застосування для балансування режимів енергетичних систем із високою часткою відновлюваних джерел енергії.

Матеріали та результати досліджень. Із самого початку використання енергії людство не лише намагалося ефективно її генерувати, а й знайти способи її збереження для подальшого використання. Ще в давні часи люди застосовували накопичувачі енергії у примітивних формах, наприклад, зберігаючи тепло в гарячому камінні або використовуючи водяні млини, що запасали потенційну енергію води для її подальшого перетворення на механічну роботу. З розвитком технологій та електрифікації суспільства проблема накопичення енергії стала ще актуальнішою.

У XIX та XX століттях із появою електричних мереж та перших електростанцій людство почало шукати ефективні методи накопичення енергії, щоб забезпечити стабільність постачання електроенергії. Було розроблено та впроваджено гідроакumuлювальні електростанції, що дозволяли запасати енергію у вигляді піднятої води, яка пізніше могла використовуватися для виробництва електроенергії. Також активно досліджувалися та впроваджувалися акумуляторні батареї, які відіграли ключову роль у розвитку електротранспорту та автономних енергетичних систем.

Сьогодні накопичення енергії є невід’ємною частиною енергетичних систем усього світу. Швидкий розвиток відновлюваних джерел енергії (сонячної, вітрової, гідроенергії) призвів до необхідності створення ефективних систем збереження енергії, оскільки вироблення електроенергії цими джерелами є нерівномірним і залежить від погодних умов. Використання сучасних систем накопичення енергії дозволяє зменшити навантаження на енергомережі, підвищити їхню стабільність і забезпечити ефективне використання виробленої електроенергії. Зокрема, технології накопичення енергії, такі як рідке повітряне накопичення, набувають популярності завдяки своїй здатності зберігати великі обсяги енергії без географічних обмежень, характерних для гідроакumuлювальних станцій.

Систем накопичення енергії існує велика кількість, і кожна з них має свої особливості роботи та застосування. Для кращого розуміння принципів їхньої роботи, а також для уникнення плутанини, їх доцільно поділити на основні категорії за типом накопичення. Така класифікація дозволяє чітко визначити особливості кожного виду систем накопичення та їхню ефективність у різних сферах енергетики. Класифікацію типів накопичувачів представлено в табл. 1.

Механічні накопичувачі

Механічні накопичувачі енергії використовують механічні процеси для зберігання та вивільнення енергії. Основні типи таких систем включають гравітаційні накопичувачі енергії, маховикові системи та пневматичні системи.

Таблиця 1. Основні категорії накопичувачів енергії

Пор.№	Тип накопичення	Вид накопичувача
1	Механічні накопичувачі	Гравітаційні накопичувачі енергії (гідроакumuлювальні електростанції, системи з підйомом вантажів)
		Маховикові системи накопичення енергії
		Пневматичні системи (накопичення енергії стисненого повітря)
2	Хімічні накопичувачі	Водневі системи (виробництво водню шляхом електролізу та його подальше використання)
		Синтетичні паливні системи (метанол, аміак тощо)
3	Електрохімічні накопичувачі	Свинцево-кислотні акумулятори
		Нікель-кадмієві акумулятори
		Лужні нікель-залізні акумулятори
		Нікель-металогідридні акумулятори
		Літій-іонні акумулятори
		Літій-полімерні акумулятори
		Літій-залізо-фосфатний акумулятор
		Натрій-сірчані акумулятори
		Цинко-повітряні акумулятори
		Натрій-іонні акумулятори
4	Теплові накопичувачі	Твердотільні акумулятори
		Системи з розплавленими солями
		Теплові акумулятори на основі фазових переходів
5	Електромагнітні накопичувачі	Накопичення теплової енергії в нагрітих твердих матеріалах (камінь, бетон)
		Суперконденсатори
6	Кріогенні накопичувачі	Системи на основі надпровідникових магнітних накопичувачів (SMES)
		Кріогенні системи зберігання енергії (LAES – <i>Liquid Air Energy Storage</i>)

Гравітаційні накопичувачі енергії

Принцип роботи. Гравітаційні накопичувачі працюють за рахунок переміщення маси (води або твердого вантажу) на певну висоту під час надлишкового вироблення енергії. При необхідності енергія вивільняється, коли маса опускається, обертаючи генератор. Основні технології включають: гідроакumuлювальні електростанції (ГАЕС) – підйом води в резервуар і її спуск для вироблення енергії; системи з підйомом вантажів – використання електродвигунів для підняття маси та генераторів для зворотного процесу (як правило один і той же агрегат виконує обидві функції по чергові) [1].

До переваг даного типу накопичення слід віднести: високу надійність і довговічність (до 50 років експлуатації); високий ККД (до 80 % для ГАЕС, 70–85 % для твердих вантажів); можливість зберігання великої кількості енергії (до 10 ГВт·год) [2]. Крім того, такі системи відзначаються екологічною безпекою — в процесі роботи вони не продукують шкідливих викидів, не потребують використання рідкісноземельних або токсичних матеріалів, що сприяє їхній інтеграції у «зелену» енергетику.

Звісно, присутні і негативні моменти в даного типу систем: великі капітальні витрати; високі вимоги до місцевості (наявність водойм або відповідних геологічних умов). Однак сучасні інженерні рішення поступово долають ці обмеження — зокрема, впроваджуються вертикальні шахтні конструкції або модульні системи, здатні працювати у складних умовах або в урбанізованому середовищі. Окрему увагу приділяють питанням повторного використання існуючої інфраструктури (наприклад, старих шахт), що знижує витрати на будівництво і мінімізує екологічний вплив.

Слід зазначити, що подібні системи накопичення вже не один рік використовуються в великій кількості країн, для прикладу ГАЕС “Bath County” у штаті Вірджинія (США) 1985 рік – 3 ГВт потужності [3] або Київська ГАЕС розташована в Київській області, 1970 ті роки і зазначеною потужністю 235,5 МВт [4]. Окремо можна відзначити системи Швейцарської компанії Energy Vault, що побудувала вже кілька гравітаційних систем накопичення на основі підняття вантажу в США та Китаї. Проєкт в Китаї введений в експлуатацію ще в вересні 2023 року з максимальною потужністю 25 МВт та має назву EVx [5].

До сфер застосування подібних гравітаційних систем відносяться переважно балансування енергосистем із ВДЕ та довгострокове накопичення енергії для пікових навантажень. З огляду на глобальну декарбонізацію та активне зростання частки ВДЕ, очікується подальше розширення використання гравітаційних накопичувачів у енергетичних системах нового покоління. Окрім того, даний тип технології може бути інтегрований в мікромережі, забезпечуючи локальну енергетичну автономію для окремих об’єктів або населених пунктів.

Маховикові системи накопичення енергії

Принцип роботи. Маховикові системи накопичення енергії працюють на основі збереження кінетичної енергії у швидкообертовому роторі (маховику). Під час надлишкового вироблення енергії електродвигун розкручує маховик, накопичуючи енергію. При необхідності зворотний процес дозволяє використовувати кінетичну енергію маховика для генерації електроенергії через генератор. Основні технології включають: вакуумні маховики – розміщення маховика у вакуумній камері для мінімізації втрат через аеродинамічний опір; надпровідні підшипники – використання магнітної левітації для зменшення тертя; композиційні матеріали – застосування карбонових волокон і легких сплавів для підвищення міцності та зниження маси [6].

До переваг даного типу накопичення слід віднести: висока швидкість зарядки та розрядки (від секунд до хвилин); довговічність (понад 20 років експлуатації без значного зносу); висока ефективність (ККД до 90 %); екологічність – відсутність токсичних або рідкісноземельних матеріалів; компактність – можливість встановлення у міських умовах. Сучасні розробки також зосереджуються на інтеграції маховикових систем у модулі для мікромереж та розумних енергосистем (smart grid), де вони виконують роль буфера енергії при коливаннях навантаження або генерації. У промислових і

комерційних умовах маховики застосовуються як UPS-системи (джерела безперебійного живлення), що забезпечують миттєве покриття енергоспоживання при аварійному відключенні основного джерела живлення [7].

Що стосується недоліків то основними з них є: обмежена ємність – зазвичай використовується для короткочасного накопичення енергії; високі оберти потребують складної інженерної реалізації (контроль стабільності при швидкостях до 50 000 об/хв); чутливість до механічних пошкоджень – можливість руйнування при сильному ударі. Проте, впровадження удосконалених корпусів з високою енергоємністю та багаторівневих систем безпеки значно знижує ризики та підвищує надійність таких систем. Додатково, сучасні системи моніторингу й управління забезпечують постійний контроль температури, обертів та вібрацій, що дає змогу вчасно виявляти несправності та запобігати аваріям.

Яскравим прикладом використання маховиків в енергетичній сфері є Китай, де в місті Чанчжі (провінція Шаньсі) в 2024 році було введено в експлуатацію та підключено до електромережі найпотужнішу маховикову систему накопичення в світі. Вихідна потужність станції сягає 30 МВт, така цифра досягається завдяки 120 високошвидкісним маховикам з магнітною левітацією[8]. Попередній рекорд тримала маховикова станція в штаті Нью-Йорк “Beacon Power” загальною потужністю 20 МВт, яка була введена в експлуатацію ще в 2011 році [9].

З розглянутих механічних типів накопичувачів саме маховикові охоплюють досить різноманітні сфери застосування, а саме: балансування енергосистем (регулювання частоти електромережі); транспорт (електричні та гібридні транспортні засоби); космічна галузь (системи стабілізації супутників і космічних станцій). Також перспективним напрямом є використання маховиків у швидкісних залізничних системах для рекуперації енергії при гальмуванні поїздів. Їх гнучкість, швидкодія та екологічність роблять маховики перспективним компонентом майбутньої енергетичної інфраструктури, зокрема в умовах децентралізованого енергопостачання та переходу до цифрових енергетичних систем.

Пневматичні системи накопичення енергії

Принцип роботи. Пневматичні системи накопичення енергії (CAES – *Compressed Air Energy Storage*) зберігають енергію шляхом стиснення повітря у підземних резервуарах або спеціальних балонах. При необхідності енергія вивільняється шляхом розширення стисненого повітря через турбіну, що обертає генератор. Основні технології включають: ізотермічні CAES – використання технологій охолодження та нагрівання повітря для підвищення ефективності; адіабатичні CAES – збереження тепла, що утворюється при стисненні, для подальшого використання під час розширення; гібридні CAES – комбіновані системи з використанням відновлюваних джерел енергії [10].

Яскравими перевагами даного типу є можливість зберігання великих обсягів енергії (до 300 МВт·год); висока довговічність (до 40 років експлуатації); відносно низька вартість у порівнянні з акумуляторними

технологіями; сумісність з відновлюваними джерелами енергії (наприклад, вітроенергетикою) [11]. Крім того, такі системи можуть працювати у широкому діапазоні температур і мають низький рівень деградації з часом, що робить їх перспективними для довгострокового зберігання енергії. Інтеграція з цифровими системами керування дозволяє оптимізувати процес стиснення і розширення повітря для підвищення загальної ефективності. Крім того, такі системи можуть працювати у широкому діапазоні температур і мають низький рівень деградації з часом, що робить їх перспективними для довгострокового зберігання енергії. Інтеграція з цифровими системами керування дозволяє оптимізувати процес стиснення і розширення повітря для підвищення загальної ефективності.

Але є і деякі суттєві недоліки, до яких належить низький ККД (40-70 % залежно від технології); необхідність спеціальних геологічних умов (соляні каверни, підземні сховища); витрати енергії на стиснення та нагрівання повітря [11]. Водночас, активні дослідження спрямовані на створення наземних модульних CAES, які можуть працювати без геологічної прив'язки, що відкриває нові можливості для використання цієї технології у регіонах з обмеженим підземним простором. Водночас, активні дослідження спрямовані на створення наземних модульних CAES, які можуть працювати без геологічної прив'язки, що відкриває нові можливості для використання цієї технології у регіонах з обмеженим підземним простором.

Звісно на практиці існують вдалі реалізації пневматичних систем накопичення. До таких систем відноситься Huntorf CAES (Німеччина), що вважається першою великою комерційною установкою запущеною в 1978 році з потужністю 290 МВт, на даний час ця система має потужність 321 МВт, через модернізацію та розвиток технологій, що позитивно впливає і на ККД [12]. Іншим прикладом є проєкт McIntosh CAES у США, що продовжує працювати з початку 1990-х, демонструючи стабільність і життєздатність технології. У 2020-х роках також з'явилися нові інноваційні проєкти у Китаї та Канаді, які демонструють здатність CAES-технологій працювати в умовах змінного клімату та високої енергетичної нестабільності. Ці проєкти передбачають використання штучних резервуарів замість природних, що значно розширює можливості масштабування [13].

Найбільш поширеними сферами застосування для пневматичних систем стали: регулювання енергосистем (балансування попиту та пропозиції електроенергії); інтеграція з ВДЕ (накопичення надлишкової енергії вітро- та сонячних електростанцій); промислові застосування (резервне живлення великих споживачів) [14]. Дедалі більше уваги приділяється також застосуванню CAES у транспортній галузі, зокрема як джерело енергії для магістральних електровозів та автономного електротранспорту, що відкриває нові горизонти розвитку галузі накопичення енергії [15].

Висновки. Проведений аналіз механічних накопичувачів енергії свідчить про їхню ключову роль у підвищенні стабільності та надійності сучасних енергосистем, особливо в умовах зростаючої частки відновлюваних джерел енергії. Гравітаційні накопичувачі демонструють високу

ефективність у довготривалому зберіганні енергії, маховикові системи забезпечують оперативне регулювання потужності, а пневматичні технології відкривають можливості для масштабного накопичення з оптимальними витратами.

Попри значний потенціал цих технологій, їх широкомасштабне впровадження стримується низкою технічних, екологічних та економічних обмежень, включаючи високі капітальні витрати та необхідність адаптації до конкретних умов енергосистеми. Подальші дослідження мають бути спрямовані на вдосконалення ефективності процесів накопичення і віддачі енергії, розробку нових матеріалів і технологічних рішень, що сприятимуть розширенню сфер застосування механічних накопичувачів та і інших систем у сучасній енергетиці.

Крім того, особливої актуальності набуває інтеграція механічних накопичувачів з інтелектуальними системами керування, що дозволяє підвищити гнучкість та швидкодію енергетичних мереж. Перспективним напрямом є створення гібридних рішень, які поєднують механічне накопичення з іншими видами зберігання енергії, зокрема хімічними та тепловими. Це дозволить не лише оптимізувати витрати, а й забезпечити вищий рівень адаптивності до мінливих умов споживання та генерації електроенергії.

Узагальнюючи, механічні накопичувачі є важливим елементом стратегії сталого енергетичного розвитку, і їхнє подальше вдосконалення є необхідною умовою для формування децентралізованої, ефективної та екологічно безпечної енергосистеми майбутнього.

Список використаних джерел

1. P. Denholm E. Ela, B. Kirby and M. Milligan, “The Role of Energy Storage with Renewable Electricity Generation”, National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2010, pp. 18–22.
2. A. Hunt, T. Byers, “Gravity Energy Storage: A Review”, Applied Energy, vol. 252, 2019, pp. 113–128.
3. Вікіпедія Вільна енциклопедія. Стаття – ГАЕС Bath County. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki> (дата звернення 03.03.2025).
4. Вікіпедія Вільна енциклопедія. Стаття – Київська ГАЕС. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki> (дата звернення 03.03.2025).
5. Ecotechnica. Енергетичні технології. Комерційний гравітаційний накопичувач. URL: <https://ecotechnica.com.ua> (дата звернення 03.03.2025).
6. J. E. Hittinger, T. C. Johnson, “Flywheel Energy Storage in Power Systems”, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 34, No. 2, 2019, pp. 345–356.
7. Beacon Power. “Flywheel Energy Storage Systems”. pp. 4, 11–12. URL: <https://beaconpower.com> (дата звернення 06.03.2025).
8. ENERGY THEORY. Dinglun Flywheel Energy Storage Power Station. URL: <https://energytheory.com> (дата звернення 06.03.2025).
9. NBC. Beacon Power Flywheel Plant. URL: <https://www.nbcnews.com> (дата звернення 07.03.2025).
10. P. C. Gibb, “Compressed Air Energy Storage Technologies”, Applied Energy, vol. 250, 2019, pp. 98–115.

11. Science Direct. Journal of Energy Storage. Physical design, techno-economic analysis and optimization of distributed compressed air energy storage for renewable energy integration. URL: <https://www.sciencedirect.com> (дата звернення 07.03.2025).
12. Habr. Compressed Air Energy Storage (CAES). URL: <https://habr.com> (дата звернення 08.03.2025).
13. Clean Power Professionals Group (Only CAES in the USA). URL: <https://energycentral.com/c/cp/only-caes-usa> (дата звернення 08.03.2025).
14. R. Kushnir, “Advanced CAES Systems for Renewable Integration”, Journal of Energy Storage, vol. 33, 2021, pp. 129–141.
15. Science Direct. Impacts of intelligent transportation systems on energy conservation and emission reduction of transport systems. URL: <https://www.sciencedirect.com> (дата звернення 08.03.2025).

References

1. P. Denholm, E. Ela, B. Kirby and M. Milligan, “The Role of Energy Storage with Renewable Electricity Generation”, National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2010, pp. 18–22.
2. A. Hunt, T. Byers, “Gravity Energy Storage: A Review”, Applied Energy, vol. 252, 2019, pp. 113–128.
3. Wikipedia, The Free Encyclopedia. Article – Bath County Pumped Storage Station. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki> (accessed 03.03.2025). (Ukr).
4. Wikipedia, the free encyclopedia. Article – Kyiv PSP. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki> (accessed 03.03.2025). (Ukr).
5. Ecotechnica. Energy Technologies. Commercial Gravity Storage. URL: <https://ecotechnica.com.ua> (accessed 03.03.2025). (Ukr).
6. J. E. Hittinger, T. C. Johnson, “Flywheel Energy Storage in Power Systems”, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 34, No. 2, 2019, pp. 345–356.
7. Beacon Power. “Flywheel Energy Storage Systems”. pp. 4, 11–12. URL: <https://beaconpower.com> (accessed 06.03.2025).
8. ENERGY THEORY. Dinglun Flywheel Energy Storage Power Station. URL: <https://energytheory.com> (accessed 06.03.2025).
9. NBC. Beacon Power Flywheel Plant. URL: <https://www.nbcnews.com> (accessed 07.03.2025).
10. P. C. Gibb, “Compressed Air Energy Storage Technologies”, Applied Energy, vol. 250, 2019, pp. 98–115.
11. Science Direct. Journal of Energy Storage. Physical design, techno-economic analysis and optimization of distributed compressed air energy storage for renewable energy integration. URL: <https://www.sciencedirect.com> (accessed 07.03.2025).
12. Habr. Compressed Air Energy Storage (CAES). URL: <https://habr.com> (accessed 08.03.2025).
13. Clean Power Professionals Group (Only CAES in the USA). URL: <https://energycentral.com/c/cp/only-caes-usa> (дата звернення 08.03.2025).
14. R. Kushnir, “Advanced CAES Systems for Renewable Integration”, Journal of Energy Storage, vol. 33, 2021, pp. 129–141.
15. Science Direct. Impacts of intelligent transportation systems on energy conservation and emission reduction of transport systems. URL: <https://www.sciencedirect.com> (дата звернення 08.03.2025).

Жуков Д. Ю., аспірант, ORCID 0009-0006-3110-4664,
науковий керівник: канд. техн. наук, доцентка **О. В. Бориченко**,
Національний університет харчових технологій

ІНТЕГРАЦІЯ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ТА НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ В УКРАЇНІ: ТЕХНІЧНІ, ЕКОНОМІЧНІ ТА РЕГУЛЯТОРНІ АСПЕКТИ

INTEGRATION OF RENEWABLE ENERGY SOURCES AND ENERGY STORAGE SYSTEMS IN UKRAINE: TECHNICAL, ECONOMIC, AND REGULATORY ASPECTS

Анотація. У статті розглядаються технічні, економічні та регуляторні аспекти інтеграції ВДЕ та накопичувачів в енергосистему України. Аналізується вплив війни на енергетику, потреба у відновленні потужностей, впровадженні ВДЕ та накопичувачів. Описуються технічні рішення, економічні механізми стимулювання та вплив інтеграції на стабільність мережі. Бібл. 6.

Ключові слова: ВДЕ, накопичувачі енергії, енергосистема України, аукціони, мікромережі, РРА, гнучкість, стабільність.

Abstract. The article examines the technical, economic and regulatory aspects of the integration of RES and energy storage into the Ukrainian energy system. The impact of the war on the energy sector, the need to restore capacity, introduce RES and energy storage are analyzed. Technical solutions, economic incentives and the impact of integration on network stability are described. Ref. 6.

Keywords: RES, energy storage, Ukrainian energy system, auctions, microgrids, PPA, flexibility, stability.

Вступ. В умовах воєнних руйнувань енергетична система України зазнала значних втрат генеруючих потужностей (близько 9 ГВт) – це призвело до суттєвого дефіциту електроенергії та вимушеного запровадження графіків відключень споживачів.

Нагальною є потреба відновлення інфраструктури та введення нових сучасних потужностей. За оцінками НЕК “Укренерго”, вже в найближчі роки потрібне додаткове введення ~3,8 ГВт сонячних і 4,5 ГВт вітрових електростанцій (потреба інвестицій – близько \$8 млрд) для компенсації втрат та покриття попиту. Водночас світовий тренд переходу до відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) не сповільнюється навіть за кризових умов [1].

Україна, синхронізувавши свою енергосистему з ENTSO-E у 2022 р. і маючи ~18 % частки ВДЕ в генерації станом на середину 2024 р., стоїть перед викликом інтеграції ще більшого обсягу ВДЕ та систем накопичення енергії. Це завдання ускладнено пошкодженнями мереж, застарілістю інфраструктури та ризиками воєнних атак, але є критично важливим для підвищення стійкості енергопостачання і виконання принципу “*Build Back Better*” – відбудувати енергетику більш сучасною та надійною [1].

Мета та завдання дослідження. Метою дослідження є аналізі технічних, економічних та регуляторних аспектів інтеграції відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) та накопичувачів в енергосистему України. Завданнями дослідження є:

- проаналізувати вплив війни на енергетику України та потреби відновлення з використанням ВДЕ;
- дослідити технічні рішення для інтеграції ВДЕ, включаючи накопичення енергії, модернізацію мереж, “smart grid” та мікромережі;
- оцінити економічні механізми стимулювання ВДЕ, включаючи аукціони, Фонд гарантування прибутків та корпоративні РРА;
- дослідити вплив інтеграції ВДЕ на стабільність енергосистеми, включаючи балансування, перевантаження мереж та якість електроенергії;
- розробити рекомендації для успішної інтеграції ВДЕ та накопичувачів в енергосистему України.

Матеріал та результати дослідження.

Технічні аспекти інтеграції ВДЕ та накопичувачів. Масштабне впровадження ВДЕ вимагає гнучкості енергосистеми. Вже до війни спостерігались ситуації, коли денний профіцит генерації від СЕС та ВЕС перевищував попит, змушуючи диспетчерів задіяти всі доступні маневрові ресурси (ГАЕС у режимі закачування, маневрування ТЕС/ГЕС). Попри це, доводилось усе частіше обмежувати видачу електроенергії з ВДЕ – кількість випадків примусового скорочення генерації зросла з 3 у 2019 р. до 72 у 2021 р. [2].

Отже, без додаткових гнучких потужностей надлишкова енергія ВДЕ просто втрачається, підриваючи економіку проєктів і стабільність мережі. Ключове технічне рішення – впровадження систем накопичення енергії (*Energy Storage Systems, ESS*) для балансування. Накопичувачі (акумуляторні батареї, ГАЕС тощо) здатні запасати надлишок виробітку вдень та віддавати його у вечірні піки, забезпечуючи покриття навантаження і резерви частоти. Дослідження підтверджують, що для інтеграції зростаючої частки ВДЕ без масових відключень необхідно розвивати саме високоманеврові генеруючі потужності та нарощувати обсяги систем акумуляування енергії [2].

Це підвищить гнучкість і дозволить мінімізувати обмеження ВДЕ у майбутньому. Іншим технічним напрямом є модернізація електромереж та їх автоматизація під розподілену генерацію. Застарілі мережі України були викликом для надійності ще до війни: планувалась їх модернізація задля інтеграції більшої кількості ВДЕ [3].

Нині необхідно прискорити впровадження концепції “smart grid” – встановлення інтелектуальних систем моніторингу та керування мережею, цифрових засобів релейного захисту та автоматики. Автоматизоване керування розподільчими мережами, “цифрові двійники” мереж для прогнозування режимів, а також системи керування навантаженням (*demand response*) дозволять ефективно реагувати на коливання генерації ВДЕ і споживання. Перспективними є мікромережі – локальні сегменти мережі,

здатні працювати автономно. Мікромережі з власними джерелами (сонячні панелі, вітряки) та накопичувачами можуть від'єднуватись від магістральної мережі під час аварій чи ворожих атак, живлячи критичних споживачів.

Децентралізація через мікромережі розглядається як шлях до підвищення енергетичної незалежності і стійкості України [3].

Водночас широке розосередження генеруючих установок по мережі ставить нові вимоги до підтримання параметрів якості електроенергії. Зокрема, масове підключення СЕС у розподільчі мережі викликає нетипові перетоки реактивної потужності: хоча більшість інверторів СЕС налаштовано на коефіцієнт потужності 1, на практиці їхня генерація спричиняє зустрічні потоки реактивної енергії, збільшує втрати та струми у мережі [2].

Для підтримання напруги потрібне впровадження засобів компенсації реактивної потужності (STATCOM, керовані конденсатори) та “розумних” інверторів, здатних гнучко регулювати $\cos \phi$. Таким чином, технічна інтеграція ВДЕ та накопичувачів охоплює не лише встановлення нових пристроїв, а й комплексну автоматизацію і цифровізацію енергосистеми – від генеруючих об'єктів до мережевого господарства.

Економічні механізми стимулювання. Окрім технологічних заходів, успішна інтеграція ВДЕ потребує дієвих економічних стимулів та реформування ринку. Враховуючи європейський досвід, Україна поступово переходить від фіксованого “зеленого” тарифу до конкурентних механізмів підтримки ВДЕ [1].

У 2019 р. на законодавчому рівні запроваджено аукціонну модель підтримки, проте її реалізація затягувалась до 2023–2024 рр. Перші “зелені” аукціони на 110 МВт, проведені восени 2024 р., виявили низький інтерес інвесторів. Причинами стали не стільки недоліки самої моделі, скільки зовнішні чинники: воєнні ризики, значна заборгованість ДП “Гарантований покупець” перед виробниками за попередні періоди, цінові обмеження на ринку тощо – усе це зменшило привабливість інвестицій у ВДЕ. У відповідь Міністерство енергетики анонсувало зміни для підвищення конкурентності аукціонів: зокрема, збільшення ліміту квоти для одного інвестора з 25 до 50 % (щоб залучити крупних гравців) та перехід до механізму ринкової надбавки (*feed-in premium*) замість фіксованого тарифу [4].

Паралельно опрацьовуються шляхи зниження інвестиційних ризиків. Один із них – створення Фонду гарантування прибутків (*Price Guarantee Fund*) для ВДЕ-проектів. Запропонований фонд має забезпечити страховку довгострокових договорів купівлі-продажу електроенергії, вирішивши проблему відсутності платоспроможного гарантованого покупця та невизначеностей воєнного часу [5].

Іншим перспективним механізмом є корпоративні РРА (*Power Purchase Agreements*) – довгострокові договори між виробником “зеленої” електроенергії та приватним споживачем поза рамками державних тарифів. У світі корпоративні РРА стрімко набирають обертів: європейський ринок сягнув 10,3 ГВт у 2022 році (на 40 % більше, ніж попереднього року),

з'явилися перші угоди, що поєднують генерацію з накопиченням енергії та виробництвом “зеленого” водню. Для України корпоративні РРА можуть стати важливим джерелом інвестицій у нові ВДЕ-потужності, особливо для промислових споживачів, зацікавлених у довгостроковому забезпеченні чистою енергією. Втім, реалізація цього інструменту потребує вдосконалення правової бази – експерти відзначають необхідність ухвалення окремого законодавства щодо корпоративних РРА, оскільки лише внесення змін до Закону “Про ринок електричної енергії” може бути недостатнім [1].

Таким чином, держава має запровадити прозорі ринкові правила та гарантії, які одночасно стимулюватимуть розвиток ВДЕ і накопичувачів та мінімізуватимуть ризики для інвесторів в умовах обмеженого енергопостачання.

Вплив інтеграції ВДЕ та накопичувачів на стабільність мережі. Інтеграція високої частки ВДЕ без належних засобів гнучкості може негативно впливати на надійність та якість електропостачання. Дефіцит маневрених потужностей призводить до ситуацій, коли енергосистема не здатна достатньо швидко реагувати на зміни генерації вітру чи сонця – це загрожує частотними коливаннями та аварійними відключеннями. Застосування систем накопичення енергії й розумного керування навантаженням відіграє ключову роль у балансуванні: накопичувачі можуть надавати резерв підтримки частоти, згладжувати різкі перепади генерації, а системи автоматичного відключення/вмикання навантаження – розподіляти споживання більш рівномірно. Інша проблема – можливі перевантаження мережі та відхилення напруги у вузлах з масовим приєднанням ВДЕ. Без достатньої модернізації розподільчих мереж поява десятків нових СЕС/ВЕС на обмеженій території може перевищити пропускну здатність ліній чи трансформаторів, спричиняючи аварійні режими. Тому інтеграція розподілених ресурсів вимагає попереднього підсилення мереж (реконструкція підстанцій, збільшення перерізу ліній) та впровадження автоматизованих систем моніторингу стану мережі, які в реальному часі відстежують навантаження і генерацію. Важливим аспектом є підтримання напруги: як згадано вище, інвертори ВДЕ мають враховувати реактивну складову та співпрацювати зі станціями компенсації реактивної потужності, щоб запобігти просіданню або перенапрузі в мережі [2].

Для цього застосовують технології балансування на рівні мережі – наприклад, STATCOM та автоматичні регулятори напруги в мережах з ВДЕ. Також розглядається створення ринку допоміжних послуг гнучкості, де постачальники (традиційна генерація, накопичувачі, керовані споживачі) будуть отримувати винагороду за підтримання балансу та параметрів якості. Інтеграція ВДЕ суттєво підвищує вимоги до диспетчеризації: точне прогнозування виробітку ВЕС/СЕС, цифрові системи SCADA для швидкого реагування, алгоритми автоматичного регулювання частоти та потужності (FAPR) тощо – всі ці технології стають необхідними елементами сучасної енергосистеми, що працює з високою часткою відновлювальних джерел.

Висновки. Для успішної інтеграції відновлюваних джерел енергії та систем накопичення в Україні потрібен комплексний підхід. По-перше, технічні заходи: якнайшвидше відновлення і модернізація зруйнованої інфраструктури з урахуванням вимог гнучкості та децентралізації; розбудова високоманеврових генеруючих потужностей (наприклад, газових пікових станцій) і введення промислових систем накопичення енергії для покриття пікових навантажень та резервування частоти [2]; створення “розумних” мереж із автоматизованим керуванням розподіленою генерацією та навантаженням. Необхідно інтегрувати накопичувачі енергії на всіх рівнях – від великих ГАЕС і батарей на рівні передачі до буферних систем в розподільчих мережах та домогосподарствах – це підвищить стійкість системи до коливань і зменшить потребу у відключеннях. Перспективним напрямом є розвиток мікромереж для критичних споживачів та віддалених регіонів, що забезпечить локальну енергетичну автономність у разі пошкодження центральної мережі. По-друге, регуляторні та економічні зміни: вдосконалення нормативної бази для ринку ВДЕ – впровадження дієвої моделі аукціонів з урахуванням воєнних ризиків, реалізація механізму *feed-in premium* та створення фонду гарантування прибутків інвесторів [5]; прийняття окремого закону про корпоративні РРА для спрощення укладання прямих договорів між “зеленою” генерацією і бізнес-споживачами [1]; розвиток ринку послуг гнучкості та залучення систем накопичення як повноправних учасників ринку електроенергії.

В цілому, інтеграція ВДЕ та накопичувачів за умов обмеженого енергопостачання є не лише викликом, а й можливістю трансформувати енергосистему України – зробити її більш гнучкою, децентралізованою та стійкою до зовнішніх впливів. Реалізація зазначених технічних і регуляторних заходів забезпечить покриття енергетичних потреб країни за рахунок чистої енергії, підвищить енергобезпеку та наблизить Україну до виконання цілей Європейського зеленого курсу.

Список використаних джерел

1. FINAL STATEMENT: “Корпоративні РРА: Взаємовигідне партнерство для сталого розвитку бізнесу та енергетики”. URL: https://expro.com.ua/upload/files/Final%20Statement_PPA.pdf (дата звернення 24.03.2025).
2. Степаненко В. А., Замулко А. І., Веремійчук Ю. А., Находов В. Ф. Оцінка ризиків при інтеграції відновлюваних джерел енергії до системи електропостачання / Енергетика: економіка, технології, екологія. 2022. № 2. С. 64–74. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.2.2022.261372> (дата звернення 24.03.2025).
3. National Renewable Energy Laboratory. Ukraine fights to build a more resilient renewable energy system in the midst of war [Електронний ресурс] / National Renewable Energy Laboratory. – 10 липня 2023. URL: <https://www.nrel.gov/news/features/2023/ukraine-fights-to-build-a-more-resilient-renewable-energy-system-in-the-midst-of-war.html> (дата звернення 24.03.2025).
4. WHITE PAPER “Перші “зелені” аукціони в Україні: чи працює механізм підтримки генерації з ВДЕ?”. URL: https://expro.com.ua/upload/files/White_Paper_RES%281%29.pdf (дата звернення 24.03.2025).

5. IMEnergy, Green Deal Ukraine. Price Guarantee Fund: Presentation / IMEnergy, Green Deal Ukraine. – 2023. URL: <https://greendealukraina.org/assets/images/reports/price-guarantee-fund-presentation-imepower-gdu.pdf> (дата звернення 24.03.2025).

References

1. FINAL STATEMENT: “Korporatyvni PPA: Vzaiemovuhidne partnerstvo dlia staloho rozvytku biznesu ta enerhetyky”. URL: https://expro.com.ua/upload/files/Final%20Statement_PPA.pdf (accessed 24.03.2025). (Ukr).
2. Stepanenko V. A., Zamulko A. I., Veremiichuk Yu. A., Nakhodov V. F. Otsinka ryzykiv pry intehratsii vidnovliuvanykh dzherel enerhii do systemy elektropostachannia / Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohii, ekolohiia. 2022. No. 2. P. 64–74. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.2.2022.261372> (accessed 24.03.2025). (Ukr).
3. National Renewable Energy Laboratory. Ukraine fights to build a more resilient renewable energy system in the midst of war [Elektronnyi resurs] / National Renewable Energy Laboratory. – 10 lypnia 2023. URL: <https://www.nrel.gov/news/features/2023/ukraine-fights-to-build-a-more-resilient-renewable-energy-system-in-the-midst-of-war.html> (accessed 24.03.2025).
4. WHITE PAPER “Pershi "zeleni" auktsiony v Ukraini: chy pratsiuie mekhanizm pidtrymky heneratsii z VDE?”. URL: https://expro.com.ua/upload/files/White_Paper_RES%281%29.pdf (accessed 24.03.2025). (Ukr).
5. IMEnergy, Green Deal Ukraine. Price Guarantee Fund: Presentation [Elektronnyi resurs] / IMEnergy, Green Deal Ukraine. – 2023. URL: <https://greendealukraina.org/assets/images/reports/price-guarantee-fund-presentation-imepower-gdu.pdf> (accessed 24.03.2025). (Ukr).

UDC 621.311

Andrii Trachuk, PhD student, ORCID <https://orcid.org/0000-0001-8755-605X>,
Scientific supervisor: Dr. Sc. (Eng.), Professor **Stefan Zaichenko**,
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic
Institute”

RECOMMENDED METHODOLOGICAL APPROACHES TO THE ORGANIZATION AND IMPLEMENTATION OF AN ENERGY-SAVING CONCEPT IN THE CONTEXT OF INCREASING THE VOLUME OF RENEWABLE ENERGY GENERATION CAPACITY IN UKRAINE

РЕКОМЕНДОВАНІ МЕТОДИЧНІ ПІДХОДИ ДО ОРГАНІЗАЦІЇ ТА РЕАЛІЗАЦІЇ КОНЦЕПЦІЇ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ В КОНТЕКСТІ ЗБІЛЬШЕННЯ ОБСЯГІВ ГЕНЕРАЦІЇ ВІДНОВЛЮВАЛЬНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ В УКРАЇНІ

Abstract. Modern challenges of energy security and the need to transition to sustainable development require the implementation of innovative solutions in the field of renewable energy. This article highlights key approaches to the organization and implementation of an energy-saving concept that contributes to the effective use of renewable energy sources in Ukraine. The current state of the energy infrastructure is analyzed, the main problems are identified, and effective algorithms for optimizing generation management are proposed. Special attention is

paid to intelligent forecasting systems, technologies for accumulating excess electricity, as well as the regulatory framework necessary for the formation of a sustainable energy policy of the country. Ref. 14.

Keywords: *energy efficiency, distributed generation, sustainable energy consumption, digital control algorithms, capacity balancing, prospects for "green" energy, innovative storage technologies, energy system transformation.*

Анотація. *Сучасні виклики енергетичної безпеки та необхідність переходу до сталого розвитку вимагають впровадження інноваційних рішень у сфері відновлюваної енергетики. У статті висвітлено основні підходи до організації та впровадження енергозберігаючої концепції, що сприяє ефективному використанню відновлюваних джерел енергії в Україні. Проаналізовано сучасний стан енергетичної інфраструктури, визначено основні проблеми та запропоновано ефективні алгоритми оптимізації управління генерацією. Особливу увагу приділено системам інтелектуального прогнозування, технологіям накопичення надлишкової електроенергії, а також нормативно-правовій базі, необхідній для формування сталої енергетичної політики країни.* Бібл. 14.

Ключові слова: *енергоефективність, розподілена генерація, стале енергоспоживання, цифрові алгоритми керування, балансування потужностей, перспективи "зеленої" енергетики, інноваційні технології зберігання, трансформація енергосистеми.*

Introduction. The world's energy sector is undergoing radical transformations caused by the rapid growth of energy consumption, changes in the structure of production and the need to reduce environmental impact. In the context of the global transition to environmentally friendly technologies and the abandonment of fossil fuels, countries are facing challenges in adapting their energy systems to new realities. Ukraine, which has significant potential in the field of renewable energy, has a unique opportunity to integrate modern technologies to improve energy security, reduce dependence on imported resources and minimize climate impact.

However, despite significant prospects, the implementation of a large-scale transition to renewable energy sources (RES) in Ukraine is accompanied by numerous barriers that hinder the dynamic development of the industry. The main problems remain:

- insufficient flexibility of existing energy networks, which complicates the integration of new generating capacities;
- limitations of modern energy storage technologies, which creates difficulties in balancing the energy system;
- slow adaptation of legislative norms and lack of incentive mechanisms to attract investments in renewable energy;
- low level of digitalization of power system management, which limits opportunities for optimizing energy flows.

Given these challenges, the urgent task is to develop a strategic approach to implementing comprehensive generation management algorithms that will ensure the sustainable development of renewables. This includes the use of advanced digital technologies, such as artificial intelligence (AI), big data (Big Data) and the Internet of Things (IoT), which allow for accurate forecasting of electricity

demand, increasing the efficiency of its distribution and optimizing the operation of electricity networks [1–5].

A systematic approach to the integration of renewable energy sources requires not only technological changes, but also reform of the legislative framework and the creation of favorable conditions for attracting international investors. Important areas of development are the implementation of smart grids, decentralized energy solutions, activation of the energy storage system market, as well as the expansion of financing mechanisms for innovative projects in the field of renewable energy.

Thus, strategic planning for the development of Ukraine's energy system should be based on a comprehensive approach combining technical, organizational, economic and legal aspects. The integration of modern digital solutions and the implementation of effective investment support mechanisms will allow Ukraine to strengthen its positions in the international "green" energy market, contribute to the decarbonization of the economy and ensure long-term energy security.

The purpose and objectives of the research. The main goal of the research is to develop a comprehensive system of algorithms and technological solutions to increase energy efficiency and expand the use of renewable energy sources in Ukraine.

To achieve this goal, the following tasks were set:

- to assess the current state of renewable energy use in Ukraine and its potential for further development;
- identify the main challenges and constraints that hinder the widespread implementation of RES;
- analyze modern capacity balancing technologies and their effectiveness in stabilizing the power system;
- to study the impact of digital control algorithms on optimizing electricity generation;
- to investigate modern methods of electricity storage and their economic feasibility;
- develop recommendations for improving the regulatory framework to stimulate the development of "green" energy.

Research material and results. Renewable energy in Ukraine is one of the key areas of transformation of the national economy aimed at increasing energy independence, reducing negative impact on the environment and integration into the European energy market. Today, the share of renewable energy sources (RES) in the overall energy balance of the country is growing, which is a positive signal for the further development of the industry. However, the process of its implementation is accompanied by numerous challenges, including technical, financial, organizational and regulatory aspects.

Solar energy is showing the fastest growth rates due to the falling cost of photovoltaic panels, growing interest among households and businesses, and support from the state and international partners. Wind energy, while having significant potential, faces challenges, including the need for complex logistics to

install turbines and the difficulty of predicting electricity production, which is dependent on weather variability. At the same time, bioenergy and small hydropower have the potential to improve energy security, but their share in the overall balance remains insignificant [6–9].

The main problems hindering the expansion of renewable energy in Ukraine:

- outdated power grid infrastructure, which does not allow for the effective integration of new capacities;
- lack of modern technologies for storing electricity, which makes it difficult to balance supply and demand;
- insufficient number of financial mechanisms that would stimulate investments in renewable energy sources;
- the need for changes to the regulatory framework to facilitate a rapid transition to sustainable energy.

Innovative technologies in renewable energy

One of the most promising areas of development is the introduction of digital technologies that can optimize energy production, storage and consumption. The use of artificial intelligence (AI) and machine learning opens up new opportunities to increase the accuracy of forecasting energy flows, which allows for more efficient management of power grid [6–10].

The main advantages of using AI in renewable energy sector are:

- improved forecasting of renewable energy production, reducing risks for grid operators;
- automated load distribution, which allows reducing energy losses;
- effective management of microgrids and decentralized electricity generators;
- application of deep learning algorithms for early detection of possible technical malfunctions in power systems.

Power system balancing

For the stable operation of Ukraine's energy network, it is important to develop intelligent energy flow management systems that ensure optimal energy distribution between consumers and producers.

Key balancing methods:

- development of smart grids that respond adaptively to changes in loads;
- creation of microgrids with the possibility of autonomous operation in emergency situations;
- using Internet of Things (IoT) technologies to monitor and manage distributed energy sources;
- integration of virtual power plants that unite small producers into a single system capable of flexibly responding to market needs.

Energy storage technologies

Efficient electricity storage is a critical element of a modern energy system, as it allows for the storage of excess energy produced during peak production periods and its use during times of high demand.

The most promising perspective growing technologies:

new generation battery systems based on grapheme structures and solid-state batteries;

- hydrogen technologies that allow converting electricity into hydrogen for further use;

- Power-to-X technologies that convert electricity into fuel (e.g. synthetic methane or liquid fuels);

- the use of pumped storage plants as an effective method of long-term energy storage.

Regulatory and legal regulation and prospects

Ukraine needs to update its energy legislation to provide more favorable conditions for the development of renewable energy. This includes creating transparent mechanisms to support investors, optimizing tariff policies, and promoting integration into the European energy system [10–16].

Main areas of regulatory policy:

- expansion of financial support mechanisms for investors in renewable energy;

- creating incentives for the development of decentralized electricity generation;

- active integration into ENTSO-E, which will allow increasing electricity exports and improving the stability of the power system;

- development of auction mechanisms for new renewable energy capacities, which will help attract international investors.

Thus, the development of renewable energy in Ukraine requires a comprehensive approach that covers not only technical and economic aspects, but also institutional changes, digital transformation and the creation of a favorable investment climate. Thanks to a strategic approach and effective state support, Ukraine can become a leader in the field of “green” energy in Eastern Europe.

Conclusions. Analyzing current trends in the development of renewable energy sources (RES) in Ukraine, we can come to an important conclusion – for the effective implementation of a comprehensive strategy, significant technical, organizational and regulatory changes are necessary. The challenges associated with the integration of “green” energy into the national energy system require not only financial investments, but also a strategic rethinking of approaches to planning, regulation and administration of the energy sector.

One of the key factors for the successful implementation of this strategy is the introduction of modern digital control algorithms that will optimize the generation, distribution and consumption of electricity. In particular, the development of smart grids, the introduction of automated monitoring and

forecasting systems for energy production from renewable sources will contribute to increasing the stability and efficiency of the power system. The use of artificial intelligence and big data will help to better predict the load on the network, minimize losses and improve the balancing of supply and demand.

Particular attention should be paid to expanding the electricity storage infrastructure. Modern storage technologies, including lithium-ion batteries, pumped storage power plants and innovative hydrogen systems, should become an integral part of the country's energy strategy. The development of such capacities will allow smoothing peak loads, ensuring the stability of energy supply and increasing the level of energy security of the state.

Modernization of the legal framework also plays an important role in stimulating the development of renewable energy. Improving legislation, creating favorable conditions for investors, introducing effective feed-in tariff mechanisms, and expanding state support programs will help accelerate the transition to sustainable energy. Introducing auction pricing mechanisms for electricity from renewables will make the market more competitive, reduce the financial burden on the state budget, and at the same time attract new participants to the sector.

Ultimately, a long-term strategy for the development of renewable energy sources should be based on innovation and environmental responsibility. Given Ukraine's huge potential in solar, wind and bioenergy, our country has every chance of becoming a key player in the "green" energy market in Europe. Implementing ambitious climate goals, focusing on international standards of sustainable development, developing international cooperation and exporting "green" energy – all this will contribute to strengthening the country's energy independence and its competitiveness at the global level.

Thus, only a comprehensive approach that encompasses technological innovations, energy market reform, expanding electricity storage capabilities, and improving legislation will allow Ukraine to make a qualitative breakthrough in the field of renewable energy.

References

1. International Renewable Energy Agency (IRENA). (2023) Renewable Capacity Statistics 2023. URL: <https://www.irena.org/Publications/2023/Mar/Renewable-capacity-statistics-2023> (accessed 15.03.2025).
2. International Energy Agency (IEA). (2023) World Energy Outlook 2023. URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023> (accessed 15.03.2025).
3. United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). (2023) Nationally Determined Contributions under the Paris Agreement. URL: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/nationally-determined-contributions-ndcs> (accessed 15.03.2025).
4. European Commission (2023) The European Green Deal. URL: https://ec.europa.eu/clima/eu-action/european-green-deal_en (accessed 15.03.2025).
5. World Bank (2023) Scaling Up Renewable Energy in Developing Countries: Challenges and Opportunities. URL: <https://www.worldbank.org/en/topic/energy/publication/scaling-up-renewable-energy-in-developing-countries> (accessed 15.03.2025).

6. REN21 (2023) Renewables 2023 Global Status Report. URL: <https://www.ren21.net/reports/global-status-report/> (accessed 15.03.2025).
7. BloombergNEF (2023) New Energy Outlook 2023. URL: <https://about.bnef.com/new-energy-outlook/> (accessed 15.03.2025).
8. IRENA (2023) Innovation Outlook: Smart Grids. URL: <https://www.irena.org/publications/2023/Jan/Innovation-Outlook-Smart-Grids>. (accessed 15.03.2025).
9. IEA (2023) Renewable Energy Market Update: Outlook for 2023 and 2024. URL: <https://www.iea.org/reports/renewable-energy-market-update-may-2023> (accessed 15.03.2025).
10. IRENA (2023) Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030. URL: <https://www.irena.org/publications/2023/Feb/Electricity-Storage-and-Renewables-Costs-and-Markets-to-2030> (accessed 15.03.2025).
11. World Economic Forum (2023) Fostering Effective Energy Transition 2023.
12. IRENA (2023) Renewable Energy and Jobs – Annual Review 2023.
13. IEA (2023) Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector.
14. IRENA (2023) Future of Solar Photovoltaic: Deployment, Investment, Technology, Grid Integration and Socio-economic Aspects.
15. World Economic Forum (2023) Fostering Effective Energy Transition 2023. URL: <https://www.weforum.org/reports/fostering-effective-energy-transition-2023> (accessed 15.03.2025).
16. International Renewable Energy Agency (IRENA) (2023) Renewable Energy and Jobs – Annual Review 2023. URL: <https://www.irena.org/publications/2023/Sep/Renewable-Energy-and-Jobs-Annual-Review-2023> (accessed 15.03.2025).

Список використаних джерел

1. Міжнародна агенція з відновлюваної енергії (IRENA). (2023). Renewable Capacity Statistics 2023. URL: <https://www.irena.org/Publications/2023/Mar/Renewable-capacity-statistics-2023> (дата звернення 15.03.2025).
2. Міжнародне енергетичне агентство (IEA) (2023) World Energy Outlook 2023. URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023> (дата звернення 15.03.2025).
3. Рамкова конвенція ООН про зміну клімату (РКЗК ООН) (2023) Національно визначені внески за Паризькою угодою. URL: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/nationally-determined-contributions-ndcs> (дата звернення 15.03.2025).
4. Європейська комісія (2023) Європейська зелена угода. URL: https://ec.europa.eu/clima/eu-action/european-green-deal_en (дата звернення 15.03.2025).
5. Світовий банк (2023) Розширення відновлюваної енергетики в країнах, що розвиваються: виклики та можливості. URL: <https://www.worldbank.org/en/topic/energy/publication/scaling-up-renewable-energy-in-developing-countries> (дата звернення 15.03.2025).
6. REN21 (2023) Звіт про глобальний стан відновлюваних джерел енергії 2023. URL: <https://www.ren21.net/reports/global-status-report/> (дата звернення 15.03.2025).
7. BloombergNEF (2023) New Energy Outlook 2023. URL: <https://about.bnef.com/new-energy-outlook/> (дата звернення 15.03.2025).
8. IRENA (2023) Інноваційна перспектива: розумні електромережі. URL: <https://www.irena.org/publications/2023/Jan/Innovation-Outlook-Smart-Grids>. (дата звернення 15.03.2025).
9. IEA (2023) Оновлення ринку відновлюваної енергетики: перспективи на 2023 та 2024 роки. URL: <https://www.iea.org/reports/renewable-energy-market-update-may-2023> (дата звернення 15.03.2025).

10. IRENA (2023) Зберігання електроенергії та відновлювані джерела енергії: витрати та ринки до 2030 року. URL: <https://www.irena.org/publications/2023/Feb/Electricity-Storage-and-Renewables-Costs-and-Markets-to-2030> (дата звернення 15.03.2025).
11. Всесвітній економічний форум (2023) Сприяння ефективному енергетичному переходу 2023.
12. IRENA (2023) Відновлювана енергія та робочі місця – Річний огляд 2023.
13. MEA (2023) Net Zero до 2050 року: дорожня карта для глобального енергетичного сектора.
14. IRENA (2023) Майбутнє сонячної фотоелектричної енергії: розгортання, інвестиції, технології, інтеграція в мережу та соціально-економічні аспекти.
15. Всесвітній економічний форум (2023) Стимулювання ефективного енергетичного переходу 2023. URL: <https://www.weforum.org/reports/fostering-effective-energy-transition-2023> (дата звернення 15.03.2025).
16. Міжнародна агенція з відновлюваної енергії (IRENA) (2023) Renewable Energy and Jobs – Annual Review 2023. URL: <https://www.irena.org/publications/2023/Sep/Renewable-Energy-and-Jobs-Annual-Review-2023> (дата звернення 15.03.2025).

УДК 621.31

Житницький С. О., аспірант, ORCID 0009-0005-8803-3871,
науковий керівник: канд. техн. наук, доцент **Д. В. Федоша**,
Національний університет “Запорізька політехніка”

ОГЛЯД ПІДХОДІВ ДО ВИЗНАЧЕННЯ ТОПОЛОГІЇ ЖИВИЛЬНИХ ТА РОЗПОДІЛЬЧИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

OVERVIEW OF APPROACHES FOR DEFINING THE TOPOLOGY OF POWER SUPPLY AND DISTRIBUTION ELECTRICAL NETWORKS

Анотація. Сучасні електроенергетичні системи розвиваються в умовах зростання попиту та впровадження нових технологій генерації. Традиційні методи проєктування не враховують нестабільність ВДЕ та необхідність автоматизації управління. Дослідження систематизує методи формування топології електромереж для підвищення їхньої ефективності та гнучкості. Розглянуто фактори впливу, типи топологій (радіальні, кільцеві, мережеві, мікромережі, Smart Grid) та алгоритми оптимізації (MST, PFA, GA, PSO, ACO). Використання цифрових двійників і ШІ сприяє підвищенню надійності та ефективності. Комплексний підхід, що поєднує класичні методи та інтелектуальні технології, забезпечує стабільність і масштабованість електромереж. Бібл. 6.

Ключові слова: топологія, електромережа, відновлювані джерела енергії, алгоритми оптимізації, штучний інтелект, smart grid, цифровий двійник.

Abstract. Modern power systems are evolving under increasing demand and the implementation of new generation technologies. Traditional design methods do not account for the instability of renewable energy sources (RES) and the need for automated control. This study systematizes methods for power grid topology formation to enhance efficiency and flexibility. The study examines influencing factors, topology types (radial, ring, mesh, microgrids, Smart Grid), and optimization algorithms (MST, PFA, GA, PSO, ACO). The use of digital twins and artificial intelligence (AI) improves reliability and efficiency. A comprehensive approach combining

classical methods and intelligent technologies ensures power grid stability and scalability. Ref. 6.

Keywords: *topology, power grid, renewable energy sources, optimization algorithms, artificial intelligence, smart grid, digital twin.*

Вступ. Сучасні електроенергетичні системи розвиваються в умовах стрімкого зростання попиту на електроенергію та впровадження нових технологій генерації. За прогнозами ІЕА [1], до 2027 року глобальне споживання електроенергії зростатиме на 4 % щорічно, що створює значне навантаження на існуючі електромережі. Основними чинниками цього зростання є активна електрифікація транспорту, розширення енергоємного виробництва та розвиток цифрової економіки, включаючи дата-центри та індустрію штучного інтелекту.

Традиційні методи проектування електромереж не відповідають новим викликам, пов'язаним із нестабільністю виробництва електроенергії з відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), необхідністю підвищення надійності систем та впровадженням автоматизованих технологій управління. У цьому контексті актуальним є дослідження алгоритмів формування топології розподільчих мереж, що дозволяють забезпечити їхню гнучкість, ефективність та адаптивність до змінних умов експлуатації.

Метою досліджень є систематизація сучасних методів формування топології електричних мереж.

Фактори впливу на формування топології. Формування топології електромереж залежить від кількох взаємопов'язаних факторів. Перш за все, зростання енергоспоживання та урбанізація [2] створюють додаткове навантаження на мережу, що вимагає оптимального розподілу потужності та резервування ліній. Водночас перехід до децентралізованої генерації змінює традиційну модель передачі електроенергії, оскільки розподілені джерела генерації, такі як сонячні та вітрові станції, вимагають нових механізмів балансування потужності.

Окрім цього, кліматичні зміни спричиняють збільшення частоти екстремальних погодних явищ, таких як урагани, спека чи заморозки, що негативно впливають на стабільність роботи мереж. Для підвищення стійкості необхідно передбачати резервні маршрути електропостачання, а також впроваджувати автоматизовані системи виявлення та усунення аварій.

Іншим важливим фактором є розвиток цифрових технологій та автоматизації управління. Використання інтелектуальних систем, таких як Smart Grid, дозволяє оптимізувати потоки електроенергії та оперативно реагувати на зміни навантаження, що підвищує ефективність роботи мережі та мінімізує ризики збоїв.

Виклики та обмеження. Надійність та резервування. Умови безперервного електропостачання залежать від здатності мережі справлятися з несподіваними відмовами обладнання чи аварійними ситуаціями. Для цього необхідне ефективне резервування ліній та розподілення навантаження між декількома джерелами живлення. Запровадження кільцевих та мережевих

топологій, а також мікромереж дозволяє підвищити відмовостійкість системи.

Балансування ВДЕ. Оскільки відновлювані джерела енергії є нестабільними через погодні умови, їхня інтеграція в електромережу потребує особливих механізмів балансування. Використання накопичувачів енергії, таких як батареї та гідроакумуючі станції, дозволяє згладжувати коливання генерації. Також важливо впроваджувати інтелектуальні системи управління, що можуть прогнозувати виробіток та попит у режимі реального часу.

Автоматизація управління. Впровадження SCADA-систем, цифрових двійників та ШІ-алгоритмів дозволяє оперативно реагувати на зміни у мережі та виконувати автоматичну оптимізацію розподілу потужності. Розвиток автоматизованих мереж забезпечує швидке відновлення після збоїв, зменшення втрат електроенергії та підвищення ефективності її використання.

Типи топології розподільчих мереж. Вибір топології розподільчої електромережі впливає на її надійність, ефективність та здатність адаптуватися до змін у споживанні та генерації. Найбільш поширеними є такі типи топології:

Радіальна топологія є найбільш простою та економічною у реалізації [3], проте має низьку стійкість до аварій, оскільки відмова в одній точці може призвести до відключення всього сегмента мережі.

Кільцева топологія забезпечує резервування електропостачання, дозволяючи перерозподіляти потоки електроенергії у разі аварії, що значно підвищує надійність мережі.

Мережеві (*Mesh*) топології складаються з множинних зв'язків між вузлами, що забезпечує високу стійкість до відмов, проте такі мережі потребують складнішої системи управління.

Мікромережі (*Microgrids*) – автономні енергетичні системи, які можуть працювати незалежно від основної мережі та використовувати локальні джерела генерації.

Smart Grid – сучасні інтелектуальні мережі, що використовують автоматизоване управління, адаптивне балансування потужностей та технології прогнозування для підвищення ефективності енергопостачання.

Алгоритми формування топології. Сучасні методи проектування електромереж базуються на використанні математичних моделей та алгоритмів оптимізації. Класичні математичні методи, такі як Minimum Spanning Tree (MST) [4] та метод потоків потужності (*Power Flow Analysis*, PFA), дозволяють розрахувати мінімально необхідну інфраструктуру для електропостачання.

Метод PFA є одним із ключових математичних інструментів для аналізу та проектування топології розподільчих електромереж. Він використовується для розрахунку розподілу активної та реактивної потужності між вузлами мережі, визначення напруги на шинах та втрат у лініях електропередачі.

Вибір алгоритму побудови мінімального остовного дерева (MST) для проектування топології залежить від щільності мережі, структури навантажень та вимог до резервування. Ключовими алгоритмами MST є алгоритм Прима, алгоритм Крускала, алгоритм Борувки. Кожен з них має свої особливості, які впливають на ефективність формування топології окремих типів розподільчих мереж: міські розподільчі мережі, розподільчі мережі у сільській місцевості, великі регіональні мережі тощо.

Методи MST та PFA є фундаментальними інструментами для проектування та оптимізації електричних мереж але ці методи працюють із статичними моделями, які розглядають електричну мережу у фіксованому стані, без урахування змін у навантаженні, генерації або топології мережі в реальному часі.

Сучасні методи проектування електромереж все частіше використовують гнучкі математичні підходи, такі як генетичні алгоритми (*Genetic Algorithms*, GA) та роєві алгоритми (*Particle Swarm Optimization*, PSO; *Ant Colony Optimization*, ACO) [5]. Ці методи дозволяють ефективно знаходити оптимальні варіанти мережі, які враховують змінні умови експлуатації.

Генетичні алгоритми (GA) працюють за принципом природного відбору: спочатку створюються різні варіанти топологій мережі, потім найкращі з них відбираються і комбінуються між собою, створюючи нові варіанти. Цей процес повторюється, доки не знайдеться оптимальне рішення, наприклад, конфігурація мережі з найменшими втратами електроенергії або витратами на будівництво.

Алгоритм оптимізації рою частинок (PSO) працює за аналогією з поведінкою зграї птахів або рою комах. Кожна “частинка” представляє певний варіант рішення (наприклад, точку підключення обладнання). Частинки переміщуються у просторі пошуку, враховуючи досвід інших частинок, і таким чином знаходять оптимальну конфігурацію мережі з мінімальними втратами енергії або витратами.

Алгоритм мурашиної колонії (ACO) базується на поведінці мурах, що шукають найкоротші маршрути. В контексті електромережі, цей алгоритм допомагає знайти оптимальні шляхи передачі електроенергії з мінімальними втратами або з максимальним резервуванням. Агенти (“мурахи”) послідовно аналізують можливі маршрути і адаптивно вибирають найефективніший.

Використання цифрових двійників дозволяє створити цифрову копію електромережі, яка оновлюється в режимі реального часу. Це дозволяє прогнозувати роботу мережі, швидко реагувати на зміни навантаження та генерації, а також планувати її розвиток на основі аналізу великих масивів даних.

Застосування штучного інтелекту (ШІ) [6] дає змогу автоматизувати управління електромережею, ефективно змінюючи маршрути передачі енергії залежно від реального стану генерації та споживання. Це сприяє зниженню втрат енергії та забезпечує стабільну роботу мережі в умовах постійних змін.

Висновки. Проектування топології живильних та розподільчих електромереж є складним завданням, що потребує використання оптимізаційних та аналітичних методів. MST забезпечує початкову оптимізацію структури мережі, дозволяючи знайти ефективні рішення залежно від особливостей її конфігурації. Проте ці алгоритми не адаптуються до змін у навантаженні та генерації, що обмежує їхню ефективність у динамічних умовах.

PFA відіграє ключову роль у розподілі енергії, дозволяючи оцінювати втрати потужності, балансувати навантаження та інтегрувати ВДЕ. З огляду на зростання частки розподіленої генерації, PFA став невід’ємним інструментом адаптивного управління топологією.

Сучасні мережі потребують інтелектуальних підходів, таких як генетичні алгоритми, методи рою частинок та цифрові двійники, що забезпечують прогнозування навантажень, управління ризиками та автоматичну оптимізацію параметрів мережі. Концепція самоорганізованих мереж дозволяє ідентифікувати аварії та змінювати маршрути передачі енергії без втручання операторів. Формування мікромереж підвищує енергонезалежність об’єктів та забезпечує стабільність електропостачання.

Створення ефективної та стійкої енергетичної інфраструктури вимагає комплексного підходу, що поєднує класичні оптимізаційні алгоритми, методи аналізу потоків потужності та інтелектуальні технології прогнозування та адаптації. Це дозволяє забезпечити масштабованість та надійність електромереж в умовах сучасного енергетичного розвитку.

Список використаних джерел

1. Growth in global electricity demand is set to accelerate in the coming years as power-hungry sectors expand (Електронний ресурс) / The International Energy Agency (IEA) – 14 лютого 2025. URL: <https://www.iea.org/news/growth-in-global-electricity-demand-is-set-to-accelerate-in-the-coming-years-as-power-hungry-sectors-expand> (дата звернення 24.03.2025).
2. Вплив мегатенденцій на частку енергетики у комунальному секторі окремих країн / Я. І. Глущенко, О. О. Корогодова, Т. Є. Моїсєнко, Н. О. Черненко – Економічний вісник НТУУ “Київський політехнічний інститут”, 2022. – С. 28–34.
3. Алгоритм визначення проміжних вузлів навантаження радіальних розподільчих мереж / А. П. Заболотний, Д. В. Федоша, К. І. Парусімова, С. В. Усенко – Запоріжжя: Електротехніка і електроенергетика, 2010. – С. 68–71.
4. A Comparative Study Of Minimal Spanning Tree Algorithms / ResearchGate GmbH – березень 2020. URL: https://www.researchgate.net/publication/340975690_A_Comparative_Study_Of_Minimal_Spanning_Tree_Algorithms (дата звернення 24.03.2025).
5. Particle Swarm Optimization for an Optimal Hybrid Renewable Energy Microgrid System under Uncertainty (Електронний ресурс) / MDPI AG – 15 січня 2024. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/2/422> (дата звернення 24.03.2025).
6. AI and Generative AI: transforming Europe’s electricity grid for a sustainable future (Електронний ресурс) / Directorate-General for Communications Networks, Content and Technology – 3 жовтня 2024. URL: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/ai-and-generative-ai-transforming-europes-electricity-grid-sustainable-future> (дата звернення 24.03.2025).

References

1. Growth in global electricity demand is set to accelerate in the coming years as power-hungry sectors expand. URL: <https://www.iea.org/news/growth-in-global-electricity-demand-is-set-to-accelerate-in-the-coming-years-as-power-hungry-sectors-expand> (accessed 14.03.2025).
2. The Impact of Megatrends on the Energy Share in the Municipal Sector of Selected Countries / Ya. I. Hlushchenko, O. O. Korohodova, T. Ye. Moiseienko, N. O. Chernenko – Economic Bulletin of NTUU “Kyiv Polytechnic Institute”, 2022. – pp. 28–34. (Ukr).
3. Algorithm for Determining Intermediate Load Nodes in Radial Distribution Networks / A. P. Zabolotnyi, D. V. Fedosha, K. I. Parusimova, S. V. Usenko – Zaporizhzhia: Electrical Engineering and Electric Power Engineering, 2010. – pp. 68–71. (Ukr).
4. A Comparative Study Of Minimal Spanning Tree Algorithms. URL: https://www.researchgate.net/publication/340975690_A_Comparative_Study_Of_Minimal_Spanning_Tree_Algorithms (accessed 29.02.2025).
5. Particle Swarm Optimization for an Optimal Hybrid Renewable Energy Microgrid System under Uncertainty. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/2/422> (accessed 25.02.2025).
6. AI and Generative AI: transforming Europe’s electricity grid for a sustainable future. URL: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/ai-and-generative-ai-transforming-europes-electricity-grid-sustainable-future> (accessed 23.01.2025).

УДК 621.31

Цюх В. О., аспірант, ORCID 0009-0001-2312-7026,
науковий керівник: канд. техн. наук, доцент **Веремійчук Ю. А.**,
Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

АНАЛІЗ НОРМАТИВНО-ПРАВОВОГО РЕГУЛЮВАННЯ РОЗВИТКУ РОЗПОДІЛЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ В УКРАЇНІ

ANALYSIS OF THE REGULATORY FRAMEWORK FOR THE DEVELOPMENT OF DISTRIBUTED GENERATION IN UKRAINE

Анотація. У роботі розглянуто поточний стан нормативно-правового регулювання та його відповідність потребам децентралізованої енергетики. Проаналізовано основні зміни в українському законодавстві, які визначають ключову роль у формуванні концепції розподіленої генерації. Визначено регуляторні акти, що сприяють розвитку когенераційних технологій в Україні для відновлення енергетичної інфраструктури та підвищення безпеки енергозабезпечення. Бібл. 9.

Ключові слова: когенерація, розподілена генерація, енергоефективність, нормативне регулювання, ринок електроенергії, енергетична безпека.

Abstract. The article considers the current state of legal and regulatory framework and its compliance with the needs of decentralized energy. The main changes in Ukrainian legislation that determine the key role in shaping the concept of distributed generation are analyzed. Regulatory acts that promote the development of cogeneration technologies in Ukraine to restore energy infrastructure and increase the security of energy supply are identified. Ref. 9.

Keywords: *cogeneration, distributed generation, energy efficiency, regulatory framework, electricity market, energy security.*

Вступ. Європейський Союз у своїх актах підкреслює важливість стимулювання розвитку генерації з відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) та розподіленої генерації. Зокрема, оновлена Директива (ЄС) 2023/241313 Європейського Парламенту та Ради від 18 жовтня 2023 року про внесення змін до Директиви (ЄС) 2018/2001, Регламенту (ЄС) 2018/1999 та Директиви 98/70/ЄС щодо сприяння використанню енергії з відновлюваних джерел (RED III) встановлює обов'язкову цільову частку ВДЕ в кінцевому споживанні енергії на рівні 42,5 % до 2030 року з індикативним збільшенням до 45 %.

В Україні розвиток технологій розподіленої генерації та ВДЕ зумовлений сукупністю різних факторів, що впливають на енергетичний сектор, серед яких вагоме місце наразі займає руйнування інфраструктури внаслідок військових дій, необхідність підвищення енергетичної безпеки, економічні виклики та технічний розвиток. Масовані ракетні та дронів атаки на об'єкти енергетики спричинили суттєве зниження генеруючих потужностей, що призвело до нестабільності в електропостачанні. У таких умовах централізована модель генерації демонструє свою вразливість, що створює необхідність розвитку децентралізованої енергетики. За останні роки розроблено і введено в дію низку нормативно-правових актів, які сприяють переходу енергетики до більш гнучкого використання різних технологій розподіленої генерації, зокрема когенераційних технологій.

Метою дослідження є аналіз впливу чинної нормативної бази на розвиток розподіленої генерації зокрема когенераційних установок.

Матеріал і результати досліджень. Для відновлення енергосистеми України та підтримання її енергетичної стійкості в умовах постійних російських атак, органи виконавчої влади на усіх рівнях стимулюють розбудову розподіленої генерації і прийнято низку рішень для її розвитку [1]:

- за останні роки внесено зміни до Закону України “Про ринок електричної енергії”, який визначає основні принципи функціонування ринку електроенергії, зокрема щодо розвитку розподіленої генерації та виробництва енергії з альтернативних джерел;

- затверджено Національний план дій з відновлюваної енергетики на період до 2030 року та план заходів з його реалізації, що передбачає розвиток розподіленої генерації та активних споживачів енергії. Зокрема Національний план з розвитку відновлюваної енергетики є доповненням Національного плану з енергетики та клімату (НПЕК) та визначає траєкторії розвитку відновлюваної енергетики за секторами до 2030 року із заходами щодо їх реалізації з урахуванням політик та заходів, визначених НПЕК;

- у Законі України “Про комбіноване виробництво теплової та електричної енергії (когенерацію) та використання скидного енергопотенціалу” зміни від 2023 року ввели новий механізм кваліфікації

когенераційних установок відповідно до європейських стандартів, що стимулює інвестиційну складову;

– водночас Законом України “Про альтернативні джерела енергії” надано право застосування механізму самовиробництва до 31 грудня 2029 р. для генеруючих установок, що виробляють електричну енергію з викопних видів палива, зокрема газотурбінних, газопоршневих та когенераційних установок з використанням природного газу.

Окрім цього впроваджено низку законодавчих змін, зокрема Закон України “Про внесення змін до деяких законів України щодо спрощення процедури приєднання до електричних мереж”. У 2024 році було схвалено Стратегію розвитку розподіленої генерації на період до 2035 року і затвердження операційного плану заходів з її реалізації у 2024–2026 роках [2]. В якій однією з стратегічних цілей є збільшення сумарної встановленої потужності маневрової генерації з використанням газотурбінних, газопоршневих та когенераційних установок, зокрема високоефективних. Окрім цього визначена ціль сприяти здійсненню суб’єктами господарювання державної та комунальної форми власності, іншими підприємствами, організаціями та установами будівництва та/або розміщення газотурбінних, газопоршневих та когенераційних установок у стислі строки для виробництва електричної енергії (за можливості теплової енергії) на майданчиках з наявною електричною, газовою та тепловою інфраструктурою.

Враховуючи, що упродовж останніх років було прийнято низку законодавчих актів, спрямованих на децентралізацію в енергетиці, у тому числі підтримку когенераційних установок (КГУ) та інтеграцію їх у ринок допоміжних послуг. КГУ відіграють ключову роль у формуванні концепції розподіленої генерації, яка є важливим елементом енергетичної трансформації України. Окрім безпекових чинників, важливим аспектом є диверсифікація джерел енергії. Історично Україна орієнтувалася на великі централізовані енергетичні об’єкти, серед яких атомні та теплові електростанції. Проте їхня фізична вразливість та ризики припинення постачання певних видів палива зумовлюють потребу в альтернативних технологіях, що забезпечують стійкість енергосистеми. Когенераційні установки, здатні функціонувати на різних видах палива, таких як природний газ, біомаса чи водень, сприяють підвищенню енергетичної незалежності та стабільності електропостачання [3].

Одним із ключових нормативних актів є Закон України № 2955-ІХ, ухвалений у 2023 році, який визначає основи регулювання когенераційних технологій та передбачає спрощення процедур підключення КГУ до енергомереж, механізми державної підтримки та преференції для інвесторів. Закон також встановлює правила ліцензування, стандарти енергоефективності та вимоги до інтеграції когенераційних потужностей у загальну енергосистему [4].

Додатково, у відповідь на виклики воєнного стану, Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг (НКРЕКП), ухвалила рішення про спрощення умов для

суб'єктів господарювання, які впроваджують когенераційні установки для живлення об'єктів критичної інфраструктури. Це рішення спрямоване на зменшення регуляторного навантаження та прискорення процесу впровадження когенераційних технологій [5].

Відповідно до постанов НКРЕКП № 352 від 26 березня 2022 р. та № 832 від 30 квітня 2024 р. про внесення змін до постанови № 355 від 29 березня 2022 р., було встановлено особливі умови приєднання когенераційних установок до електричних та газорозподільних мереж під час дії воєнного стану. Основні положення включають пріоритетне приєднання таких об'єктів операторами мереж за умови наявності довідки військової адміністрації про необхідність термінового підключення. Також передбачено спрощену процедуру, яка скорочує терміни надання технічних умов, укладання договорів та зменшує перелік необхідних документів. Ці заходи спрямовані на забезпечення стабільного енергопостачання об'єктів критичної інфраструктури в умовах надзвичайних ситуацій [6, 7].

Постановою Кабінету Міністрів України № 1316 від 15 грудня 2023 р., було уточнено порядок кваліфікації когенераційних установок, що визначає критерії їх ефективності та відповідності екологічним стандартам. Документ встановлює процедуру сертифікації КГУ та регламентує вимоги щодо паливної ефективності, що сприятиме оптимізації їхньої роботи та зменшенню впливу на довкілля. Окрему роль у впровадженні цих змін відіграє Держенергоефективності, яке відповідає за розробку методичних рекомендацій, контроль дотримання встановлених вимог і адаптацію національних стандартів до європейських норм. Запроваджені зміни спрямовані на підвищення ефективності когенераційних технологій та приведення регуляторної бази України у відповідність до вимог європейського енергетичного ринку [8].

У червні 2024 року (НКРЕКП), запровадила механізм спеціальних аукціонів на ринку допоміжних послуг. Відповідно до цих змін, можна говорити про залучення КГУ до ринку допоміжних послуг, вони дозволяють брати участь у торгах для забезпечення резервів підтримки частоти та регулювання активної потужності, укладаючи довгострокові контракти на період до п'яти років. Такі аукціони допомагають залучати нові потужності до роботи в енергосистемі та сприяють фінансовій стабільності підприємств, що інвестують у розподілену генерацію.

Прикладом практичного впровадження цього механізму стали спеціальні аукціони, проведені НЕК “Укренерго” у серпні та грудні 2024 року, спрямовані на залучення 1 ГВт резервних потужностей для автоматичних резервів відновлення частоти (aPВЧ). За їх результатами було залучено близько 400 МВт, зокрема і від газових когенераційних установок та біопаливних станцій. Це підтверджує актуальність розвитку КГУ як гнучкого інструменту для підтримки стабільності енергомережі [9].

Серед стратегічних ініціатив варто також відзначити масштабні інвестиційні проекти, що передбачають будівництво нових когенераційних станцій. Одним із таких є проєкт “Інжура”, що отримав підтримку завдяки

новим регуляторним механізмам. У серпні 2024 року ТОВ “Інжур Енерджі” стало переможцем спеціального аукціону НЕК “Укренерго” та уклало контракт на надання допоміжних послуг із балансування системи протягом 14 годин на добу. У рамках цього проєкту передбачається будівництво газопоршневої електростанції потужністю 18 МВт, яка стане частиною інфраструктури для підтримки стабільності енергосистеми України [10]. Реалізація подібних ініціатив демонструє зростання довіри інвесторів до розподіленої генерації та сприяє інтеграції КГУ в довгострокові плани розвитку української енергетики.

Висновки. Нормативно-правові зміни останніх років створюють сприятливі умови для розвитку розподіленої генерації, а поєднання безпекових, економічних, технологічних та енергетичних викликів формує об’єктивні передумови для розвитку когенераційних технологій в Україні.

Запровадження спеціальних аукціонів, адаптація законодавства до європейських норм та підтримка інвестиційних проєктів сприяють інтеграції КГУ в енергетичну систему країни. Подальший розвиток законодавства має бути спрямований на підвищення економічної ефективності КГУ та їхню повну інтеграцію в нову модель енергетичного ринку України.

Список використаних джерел

1. Уряд ухвалив низку рішень для розвитку розподіленої генерації. Офіційний сайт Рівненської обласної державної адміністрації. URL: <https://www.rv.gov.ua/news/uriad-ukhvalyv-nyzku-rishen-dlia-rozvytku-rozpodilenoj-heneratsii> (дата звернення 06.03.2025).
2. Розпорядження Кабінету Міністрів України № 713 від 18 липня 2024 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/713-2024-%D1%80> (дата звернення 06.03.2025).
3. UNDP Ukraine. Homepage. United Nations Development Programme. URL: <https://www.undp.org/uk/ukraine> (дата звернення 06.03.2025).
4. Закон України № 2955-IX. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/2955-20> (дата звернення 06.03.2025).
5. НКРЕКП. Спрощення умов для когенераційних установок. Офіційний сайт НКРЕКП. URL: <https://www.nerc.gov.ua/news/nkrekp-sproshchuye-umovi-dlya-roboti-kogeneracijnih-ustanovok-yaki-vikoristovuyutsya-yak-rezervne-dzherelo-energiyi-dlya-obyektiv-kritichnoyi-infrastrukturi> (дата звернення 06.03.2025).
6. Постанова НКРЕКП № 352 від 26 березня 2022 року. URL: <https://www.nerc.gov.ua/acts/pro-zatverdzhennya-poryadku-timchasovogo-priyednannya-elektrostanovok-do-sistemi-rozpodilu-u-period-diyi-v-ukrayini-voyennogo-stanu> (дата звернення 07.03.2025).
7. Постанова НКРЕКП № 832 від 30 квітня 2024 року про внесення змін до постанови № 355 від 29 березня 2022 року. URL: <https://www.nerc.gov.ua/acts/pro-vnesennya-zmin-do-postanovi-nkrekp-vid-29-bereznia-2022-roku-355-2> (дата звернення 07.03.2025).
8. Постанова Кабінету Міністрів України № 1316 від 15 грудня 2023 року. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1316-2023-%D0%BF#Text> (дата звернення 07.03.2025).
9. Офіційний сайт НЕК “Укренерго”. URL: <https://ua.energy> (дата звернення 08.03.2025).
10. Inzhur Energy. URL: <https://www.inzhur.reit/funds/Energy> (дата звернення 10.03.2025).

References

1. The government has adopted a number of decisions for the development of distributed generation. Official website of Rivne Regional State Administration. URL: <https://www.rv.gov.ua/news/uriad-ukhvalyv-nyzku-rishen-dlia-rozvytku-rozpodilenoi-heneratsii> (accessed 06.03.2025). (Ukr).
2. Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 713 of July 18, 2024. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/713-2024-%D1%80> (accessed 06.03.2025). (Ukr).
3. UNDP Ukraine. Homepage. United Nations Development Program. URL: <https://www.undp.org/uk/ukraine> (accessed 06.03.2025). (Ukr).
4. Law of Ukraine No. 2955-IX. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/2955-20> (accessed 06.03.2025). (Ukr).
5. NEURC. Simplification of conditions for cogeneration plants. Official website of NEURC. URL: <https://www.nerc.gov.ua/news/nkrekp-sproshchuye-umovi-dlya-roboti-kogeneracijnih-ustanovok-yaki-vikoristovuyutsya-yak-rezervne-dzherelo-energiyi-dlya-obyektiv-kritichnoyi-infrastrukturi> (accessed 06.03.2025). (Ukr).
6. NEURC Resolution No. 352 of March 26, 2022. URL: <https://www.nerc.gov.ua/acts/pro-zatverdzhennya-poryadku-timchasovogo-priyemnannya-elektrostanovok-do-sistemi-rozpodilu-u-period-diyi-v-ukrayini-voyennogo-stanu> (accessed 07.03.2025). (Ukr).
7. NEURC Resolution No. 832 of April 30, 2024, amending Resolution No. 355 of March 29, 2022. URL: <https://www.nerc.gov.ua/acts/pro-vnesennya-zmin-do-postanovi-nkrekp-vid-29-bereznia-2022-roku-355-2> (accessed 07.03.2025). (Ukr).
8. Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 1316 of December 15, 2023. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1316-2023-%D0%BF#Text> (accessed 07.03.2025). (Ukr).
9. Official website of NPC "Ukrenergo". URL: <https://ua.energy> (accessed 08.03.2025). (Ukr).
10. Inzhur Energy. URL: <https://www.inzhur.reit/funds/Energy> (accessed 10.03.2025).

УДК 658.26

Гоєнко А. О., аспірант, ORCID 0009-0000-8896-2615,
науковий керівник: канд. техн. наук, доцент **А. В. Чернявський**,
Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

РОЗРОБКА КОНЦЕПЦІЇ ЕНЕРГОМОНІТОРИНГУ НА ПІДПРИЄМСТВАХ МОЛОЧНОЇ ГАЛУЗІ

DEVELOPMENT OF THE CONCEPT OF ENERGY MONITORING AT DAIRY INDUSTRY ENTERPRISES

Анотація. У статті розглянуто концепцію системи енергетичного моніторингу для підприємств молочної галузі, яка спрямована на підвищення ефективності використання паливно-енергетичних ресурсів. Визначено основні джерела споживання енергії, запропоновано концептуальну модель системи енергомоніторингу та розроблено типову модель її побудови. Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення управління енергоспоживанням на молочних підприємствах. Бібл. 9, рис. 3, табл. 1.

Ключові слова: енергомоніторинг, молокозавод, аналіз енергоспоживання.

Abstract. The article considers the concept of an energy monitoring system for dairy enterprises, which is aimed at increasing the efficiency of using fuel and energy resources. The main sources of energy consumption are identified, a conceptual model of an energy monitoring system is proposed, and a typical model of its construction is developed. The results obtained can be used to improve energy consumption management at dairy enterprises. Ref. 9, Fig. 3, Tabl. 1.

Key words: energy monitoring, dairy plant, energy consumption analysis.

Вступ. У сучасних умовах розвитку промисловості ефективне використання паливно-енергетичних ресурсів є критичним фактором для забезпечення економічної стабільності та конкурентоспроможності підприємств. Молочна галузь, як один із важливих секторів харчової промисловості, характеризується високим рівнем споживання енергії, що обумовлено складністю технологічних процесів та необхідністю дотримання жорстких вимог до якості продукції.

Незважаючи на зростаючу увагу до питань енергоефективності в Україні, на більшості підприємств оцінка ефективності використання енергії здійснюється безсистемно, без довготривалого аналізу динаміки змін та чинників, що їх спричиняють. Як правило, ефективність енергоспоживання оцінюється лише за показниками питомого споживання паливно-енергетичних ресурсів або частковими показниками енергоефективності, що не дозволяє сформувати комплексну картину енергетичного стану підприємства. Відсутність системного підходу до енергетичного моніторингу знижує можливості підприємств щодо впровадження заходів з енергоефективності.

Значущість енергомоніторингу підтверджується низки стандартів: ДСТУ ISO 17741:2017 [1], ДСТУ ISO 17743:2017 [2]. Ці документи визначають принципи моніторингу, вимірювання, аналізу та перевірки рівня енергоефективності в організаціях. Для забезпечення ефективного енерговикористання необхідним є запровадження постійного контролю за енергетичними показниками, аналіз споживання ресурсів та організація системи документообігу, що відображатиме динаміку енергоспоживання на підприємстві.

Застосування сучасних технологій енергомоніторингу сприяє не лише зменшенню енергетичних витрат, а й підвищенню ефективності виробництва, забезпеченню стабільної роботи обладнання та підвищенню рівня екологічної безпеки підприємства. Дослідження та розробка нових підходів до енергомоніторингу є актуальними завданнями для молочної галузі та мають вагоме значення для її подальшого розвитку.

Метою досліджень є розробка системи енергетичного моніторингу для підприємств молочної галузі з метою підвищення ефективності використання паливно-енергетичних ресурсів, зниження витрат та забезпечення сталого розвитку підприємств.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

1. Аналіз енергоспоживання молокозаводами та визначення основних видів паливно-енергетичних ресурсів, що використовуються у виробничих процесах.

2. Розробка концептуальної моделі системи енергомоніторингу для молочних підприємств.

3. Визначення основних параметрів для здійснення енергетичного моніторингу на підприємствах молочної галузі.

4. Побудова типової моделі системи енергомоніторингу підприємств молочної галузі

Матеріал і результати досліджень. Молочні підприємства є суттєвими споживачами паливно-енергетичних ресурсів (ПЕР), оскільки їхні виробничі процеси включають численні стадії обробки молока та виробництва молочної продукції. Споживання енергії на молокозаводах охоплює такі основні напрямки (табл. 1) [3].

Таблиця 1. Характеристики основних паливно-енергетичних ресурсів молокозаводу

Ресурси	Використання	Основні параметри які може бути виміряно системою моніторингу
Електроенергія	Робота технологічного обладнання (насоси, мішалки, сепаратори, гомогенізатори, фасувальні лінії), систем охолодження та заморожування, освітлення	Напруга (В), струм (А), активна потужність (кВт), реактивна потужність (кВАр), споживана електрична енергія (кВт·год), споживана реактивна електрична енергія (кВАр·год), частота (Гц)
Пара	Пастеризація, стерилізація, нагрівання води для виробничих процесів і санітарної обробки, підтримання мікроклімату	Температура (°С), тиск (Па, МПа), витрата пари (м³/год), вологість (кг/м³)
Природний газ	Виробництво пари в котлах, використання в сушильних установках	Тиск газу (Па), витрата газу (м³/год)
Технічна та гаряча вода	Використання для миття обладнання, охолодження, опалення, інші технологічні потреби	Температура (°С), тиск (Бар), витрата води (м³/год)

Ефективний моніторинг електроенергії на молочних підприємствах передбачає встановлення вимірювальних пристроїв на всіх критичних етапах енергоспоживання. На рис. 1 наведено умовну схему розміщення вимірювальних пристроїв в розподільчих щитках, система повинна містити засоби вимірювання для кожного джерела енергії, структурного підрозділу та основних споживачів. Це дозволяє створити деталізований електричний баланс підприємства, забезпечуючи аналіз ефективності використання електроенергії на рівні окремих технологічних процесів та установок.

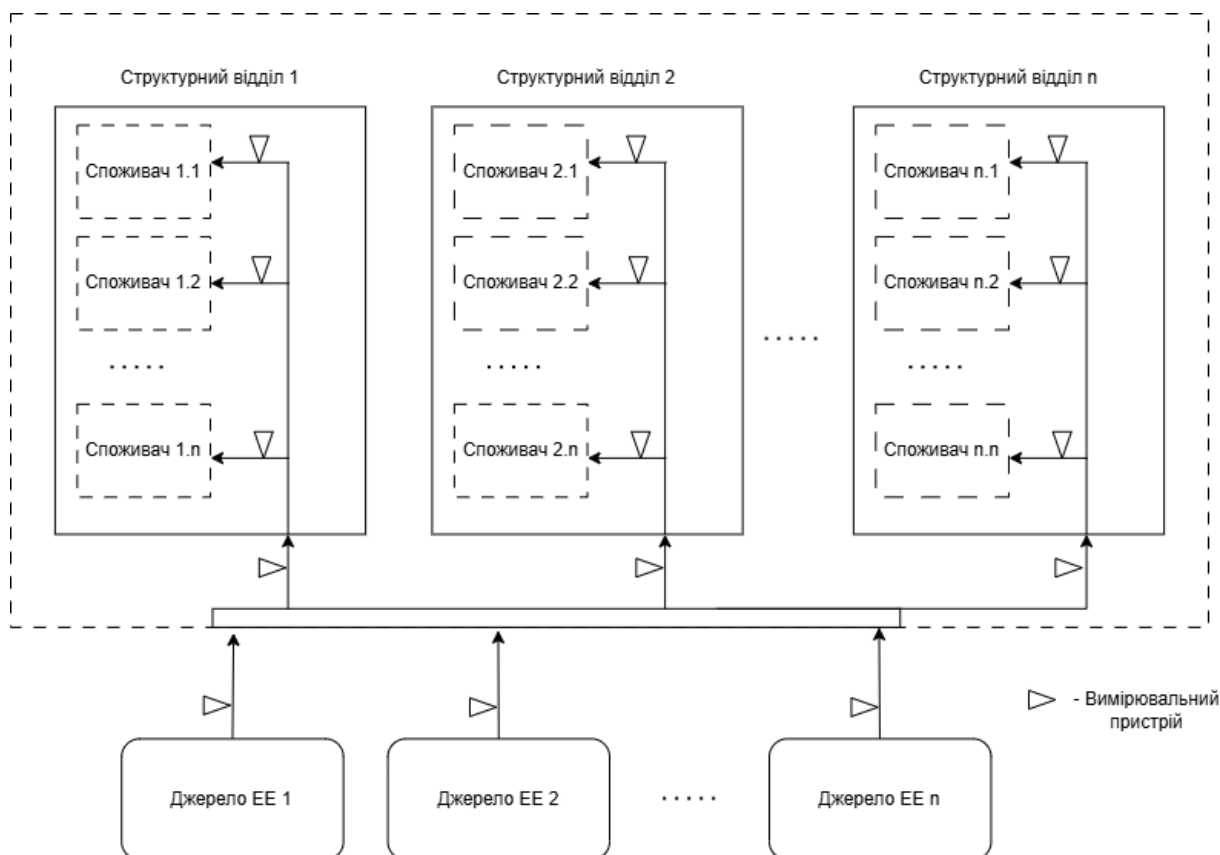


Рисунок 1. Умовна схема моніторингу електричної енергії

Система передбачає встановлення автоматичних вимірювальних пристроїв [7], які вимірюють напругу, частоту та активне і реактивне навантаження з періодичністю 1 секунда. Зберігатись в базі даних будуть агреговані дані на протязі однієї години для оперативного аналізу та прогнозування.

Для ефективного контролю та аналізу використання природного газу, води та пари необхідно встановити відповідні вимірювальні пристрої на ключових етапах споживання. Зокрема, вимірювачі слід встановити на вході природного газу в котельню, а також на виході пари та гарячої води, що генерується котельнею. Це дозволить визначати тепловий баланс котельні та оцінювати її коефіцієнт корисної дії (ККД).

Водоміри також встановлюються для обліку води, що не спрямовується на котельню, а використовується у виробничих процесах. Надалі вимірювальні пристрої для води, пари та газу розміщуються аналогічно до електроенергії – на структурних підрозділах та суттєвих споживачах, що дозволяє формувати загальний енергетичний баланс підприємства (рис. 2).

Періодичність вимірювання обумовлена встановленими вимірювальними пристроями. Для природного газу, води та пари здебільшого дані реєструються кожну секунду, а в подальшому буде відбуватись агрегація цих даних за одну годину. Такий підхід дозволяє вчасно виявляти витoki, перевитрати та оптимізувати використання ресурсів. Вимірювати можна всі показники що зазначені в табл. 1.

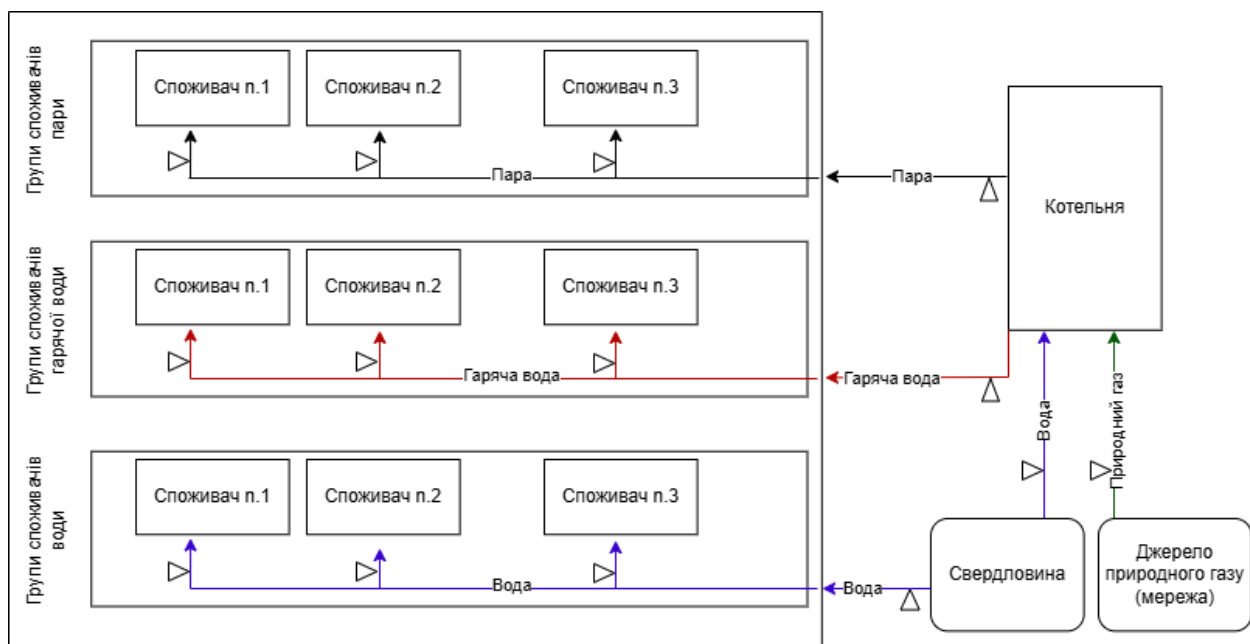


Рисунок 2. Умовна схема моніторингу води, теплової енергії та газу

Крім безпосереднього вимірювання параметрів енергії, що споживається на молокозаводі, доцільно контролювати чинники, які впливають на споживання паливно-енергетичних ресурсів або сильно корелюють з споживанням ресурсів [4, 6]. Це дозволяє більш точно аналізувати зміни у використанні енергоресурсів і здійснювати їхнє прогнозування. Наприклад, одним із найбільших споживачів електроенергії є холодильні компресорні установки та системи охолодження, робота яких значною мірою залежить від температури навколишнього середовища. Відповідно, реєстрація цього параметра допоможе пояснити динаміку споживання та підвищити точність прогнозування. До таких параметрів відноситься: температура приміщень ($^{\circ}\text{C}$), вологість повітря (%), виробництво продукції (кг/місяць) [8].

В результаті типова система моніторингу буде виглядати так, як показано на рис. 3. Всі необхідні дані про споживання паливно енергетичних ресурсів на чинників що впливають на їх споживання будуть збиратись за допомогою вимірювальних пристроїв, агрегуватись зберігатись у базі даних для подальшої обробки. На основі зібраних даних можна буде досягти цілей енергомоніторингу, а саме: отримати інформацію про енергетичний баланс підприємства, оцінити поточний рівень енергоефективності, виконувати коригувальні дії, відстежувати, прогнозувати споживання енергоресурсів, моніторити цільові показники енергоефективності, тощо [5, 9].

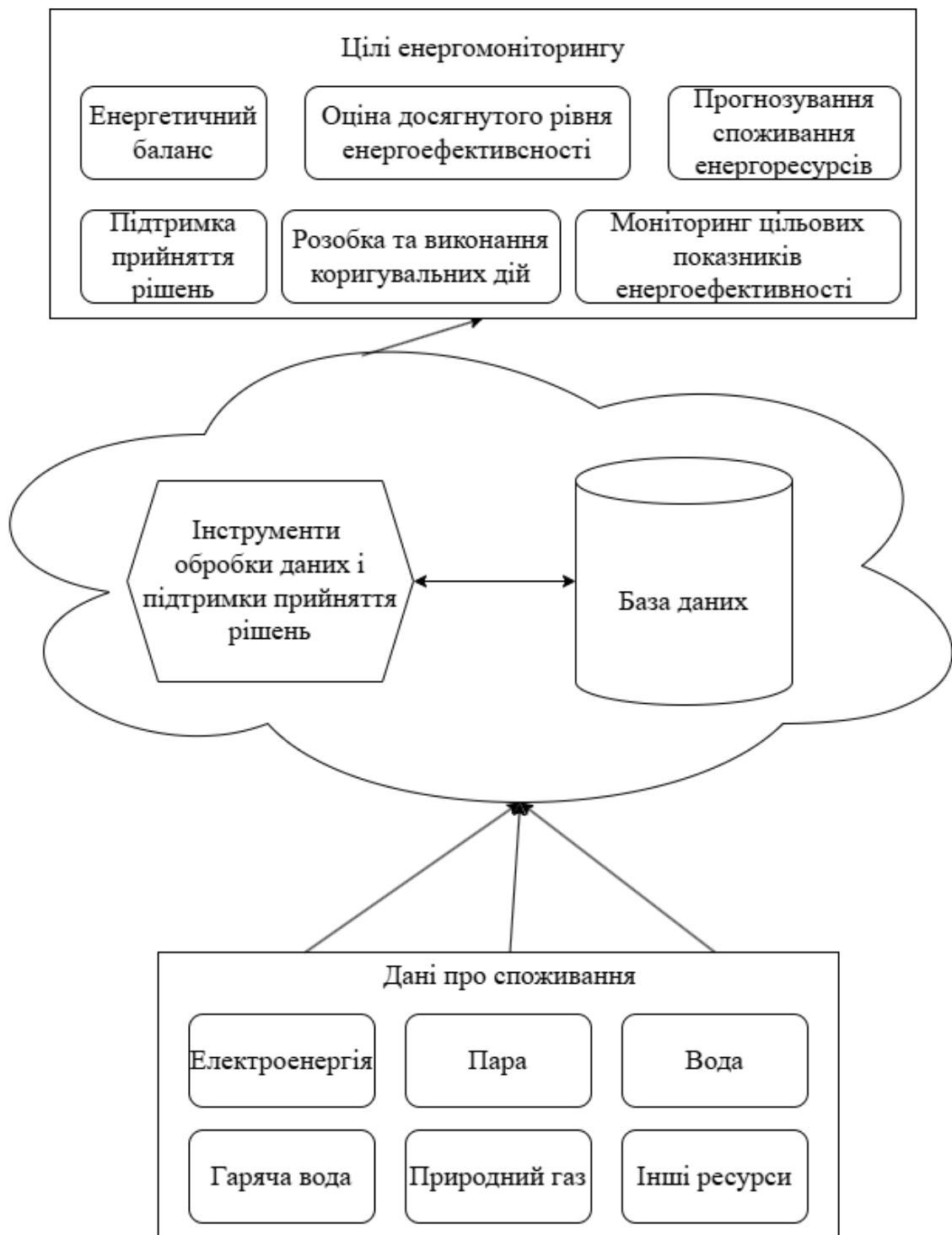


Рисунок 3. Типова схема системи енергомоніторингу

Висновки. У ході проведеного дослідження було розроблено концепцію системи енергетичного моніторингу для підприємств молочної галузі, яка дозволяє забезпечити комплексний підхід до управління паливно-енергетичними ресурсами. Запропонована система базується на використанні сучасних засобів автоматичного вимірювання параметрів споживання енергоресурсів, що, у свою чергу, забезпечує не лише оперативний аналіз, а й ефективне прогнозування енергоспоживання.

Основними результатами цього дослідження є:

- Визначено основні джерела споживання енергії на молочних підприємствах, що дає змогу здійснювати більш ефективний розподіл ресурсів, а також виявляти зони нераціонального використання енергії. Такий підхід дозволяє своєчасно виявляти потенційні втрати енергоресурсів та впроваджувати заходи для їхнього зменшення.

- Запропоновано концептуальну модель системи енергетичного моніторингу, яка включає набір вимірювальних пристроїв, що охоплюють кожен вид енергетичних ресурсів, а також ключові параметри, що підлягають постійному моніторингу. Це дозволяє забезпечити безперервний контроль за використанням енергії та отримувати актуальну інформацію для прийняття обґрунтованих управлінських рішень.

- Розроблено типову модель побудови системи енергомоніторингу, яка враховує специфічні особливості технологічних процесів молочних підприємств. Запропонована модель дає змогу здійснювати детальний аналіз енергоспоживання як на рівні окремих структурних підрозділів підприємства, так і в межах конкретних технологічних процесів. Це забезпечує високий рівень деталізації оцінки ефективності використання енергетичних ресурсів та дозволяє виявляти резерви для їх оптимізації.

- Продемонстровано можливості використання розробленої системи енергетичного моніторингу для підтримки процесу прийняття управлінських рішень, спрямованих на зниження загальних витрат підприємства, оптимізацію виробничих процесів та підвищення рівня енергоефективності. Використання таких рішень сприяє не лише економічній доцільності виробництва, а й підвищенню його екологічної стійкості.

Таким чином, розроблена система енергетичного моніторингу сприяє покращенню енергоефективності підприємств молочної галузі, підвищенню їхньої екологічної та економічної стійкості, а також створює необхідні умови для довгострокового контролю та управління процесами споживання енергетичних ресурсів.

Подальші дослідження в цьому напрямку можуть бути зосереджені на вдосконаленні методів аналізу отриманих даних, розширенні можливостей інтеграції системи енергомоніторингу з автоматизованими системами управління виробничими процесами, а також на розробці та впровадженні алгоритмів штучного інтелекту для більш точного прогнозування майбутнього енергоспоживання та виявлення потенційних точок для оптимізації ресурсів.

Список використаних джерел

1. Загальні технічні правила вимірювання, розрахунку та верифікації обсягів енергозбереження в проєктах: ДСТУ ISO 17741:2017. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=73399 (дата звернення 04.03.2025).

2. Енергозбереження. Визначення методологічної основи розрахунку та звітності щодо обсягів енергозбереження: ДСТУ ISO 17743:2017. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=73407 (дата звернення 04.03.2025).

3. Гоєнко А. О., Вибір стратегії підвищення енергетичної ефективності системи холодопостачання молокозаводу: бакалаврська робота. Київ, 2021. 130 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/4ea58242-d4d6-4bfd-9872-5ce08ffca999/content> (дата звернення 05.03.2025).
4. Гоєнко А. О., Формування оптимальної енергетичної стратегій підприємств молочної галузі з урахуванням обмеженості енергопостачання: магістерська дисертація. Київ, 2023. 120 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/66780> (дата звернення 06.03.2025).
5. Чернявський А. В., Якобчук Д. В. Інформаційно-аналітичні засоби моніторингу енергоефективності об'єктів нафтодобувної галузі. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2014. С. 106–111. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/10248> (дата звернення 04.03.2025).
6. Гече Ф. Е., Мулеса О. Ю., Гриненко В. В. Знаходження найвпливовіших факторних ознак при побудові лінійних регресійних моделей. 2019. URL: <https://journals.uran.ua/tarp/article/download/175020/177648/392805> (дата звернення 07.03.2025).
7. Вимірювальні пристрої Siemens. URL: <https://www.siemens.com/global/en/products.html> (дата звернення 05.03.2025).
8. Чернявський А. В., Гоєнко А. О. Багатокритеріальний підхід до прийняття рішень щодо вибору оптимальної стратегії реалізації потенціалу енергозбереження на молокозаводах України. 7-ма міжнародна конференція IEEE з енергорозумних систем. 2020. С. 418–423. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9160061> (дата звернення 07.03.2025).
9. Коцар О., Карпенко А., Актуальні проблеми енергомоніторингу на муніципальних об'єктах. *Енергетика і автоматика*. 2022. С. 63–65. URL: <https://journals.nubip.edu.ua/index.php/Energiya/article/view/51317/15993> (дата звернення 05.03.2025).

References

1. General Technical Rules for Measurement, Calculation, and Verification of Energy Savings in Projects: DSTU ISO 17741:2017. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=7339 (accessed 04.03.2025). (Ukr).
2. Energy Savings. Definition of the Methodological Basis for Calculation and Reporting of Energy Savings: DSTU ISO 17743:2017. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=73407 (accessed 04.03.2025). (Ukr).
3. Hoienko A. O., Selection of a Strategy for Increasing the Energy Efficiency of a Dairy Plant's Refrigeration System: Bachelor's Thesis. Kyiv, 2021. 130 p. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/4ea58242-d4d6-4bfd-9872-5ce08ffca999/content> (accessed 05.03.2025). (Ukr).
4. Hoienko A. O., Formation of an Optimal Energy Strategy for Dairy Industry Enterprises Considering Energy Supply Limitations: Master's Dissertation. Kyiv, 2023. 120 p. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/66780> (accessed 06.03.2025). (Ukr).
5. Cherniavskiy A. V., Yakobiuk D. V. Information-Analytical Tools for Monitoring the Energy Efficiency of Oil Production Facilities. *Energy: Economics, Technology, Ecology*. 2014. pp. 106–111. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/10248> (accessed 06.03.2025). (Ukr).
6. Heche F. E., Mulesa O. Yu., Grynenko V. V., Identification of the Most Influential Factor Features in the Development of Linear Regression Models. 2019. URL: <https://journals.uran.ua/tarp/article/download/175020/177648/392805> (accessed 05.03.2025). (Ukr).

7. Siemens Measuring Devices.
URL: <https://www.siemens.com/global/en/products.html> (accessed 05.03.2025).
8. A. Cherniavskyi, A. Hoienko, “A multi-criteria approach to decision-making on choosing the optimal strategy for implementing the energy-saving potential at Ukrainian dairies” in Proc. 2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS). – IEEE, 2020. pp. 418–423. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9160061> (accessed 07.03.2025).
9. Kotsar O., Karpenko A. Current Issues of Energy Monitoring at Municipal Facilities. Energy and Automation. 2022. pp. 63–65. URL: <https://journals.nubip.edu.ua/index.php/Energiya/article/view/51317/15993> (accessed 05.03.2025). (Ukr).

УДК 621.313.322-843.6

Тітов Є. О., аспірант, ORCID 0009 0007 8222 7477,
науковий керівник: канд. техн. наук, доцент М. А. Коваленко,
Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

ВПЛИВ РЕЖИМІВ НАВАНТАЖЕННЯ НА ФОРМУ КРИВОЇ НАПРУГИ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ДИЗЕЛЬ- ЕЛЕКТРОГЕНЕРАТОРНОЇ УСТАНОВКИ

INFLUENCE OF LOAD MODES ON THE SHAPE OF THE VOLTAGE CURVE OF THE SYNCHRONOUS GENERATOR OF A DIESEL GENERATING SET

Анотація. У статті досліджується вплив режимів навантаження на форму кривої напруги синхронного генератора дизель-електрогенераторної установки (ДГУ). Аналізуються особливості напруги при різних рівнях навантаження (0 %, 50 %, 100 %), а також робота автоматичного регулятора напруги (AVR). Виявлено, що зміна навантаження впливає на гармонійні спотворення та стабільність електропостачання, що є критично важливим для надійності автономних енергосистем. Запропоновано методiku оцінки стабільності вихідної напруги та рекомендації щодо покращення роботи генераторних систем. Бібл. 4, рис. 6.

Ключові слова: автономні електромеханічні перетворювачі, електрогенеруючі пристрої, експлуатація, енергоефективність, надійність, технічне обслуговування, електропостачання, генераторні системи.

Abstract. The article examines the impact of load modes on the voltage waveform of a synchronous generator in a diesel generating set (DGS). The characteristics of voltage at different load levels (0 %, 50 %, 100 %) and the operation of the automatic voltage regulator (AVR) are analyzed. It was found that load variations affect harmonic distortions and power supply stability, which is crucial for the reliability of autonomous energy systems. A methodology for assessing voltage stability is proposed, along with recommendations for improving generator system performance. Ref. 4, Fig. 6.

Keywords: autonomous electromechanical converters, power generating devices, operation, energy efficiency, reliability, maintenance, power supply, generator systems.

Вступ. Стабільність напруги синхронного генератора ДГУ суттєво залежить від режимів навантаження, що впливає на якість електроживлення. Гармонійні спотворення та нестабільність сигналу можуть призводити до перегріву обладнання, втрат потужності та збоїв у чутливих системах, що є критичним для військових, медичних і промислових застосувань. Наукова новизна дослідження полягає у комплексному аналізі впливу режимів навантаження на форму кривої напруги генератора та визначенні ключових факторів, що спричиняють гармонійні спотворення. Запропоновано методику оцінки стабільності вихідної напруги та ефективності роботи автоматичного регулятора напруги (AVR), що може бути використано для вдосконалення систем керування збудженням і мінімізації негативного впливу гармонік на електроспоживачів.

Метою досліджень є аналіз форми кривої напруги синхронного генератора дизельгенераторної установки (ДГУ) при різних рівнях навантаження (0 %, 50 %, 100 %), а також дослідження характеристик вихідного сигналу автоматичного регулятора напруги (AVR) за тих самих умов.

Матеріал і результати досліджень. Несинусоїдальність напруги, зокрема гармонійні спотворення на синхронних генераторах, серйозно впливає на якість електроенергії та роботу обладнання. Ідеальна синусоїдальна форма напруги необхідна для ефективної роботи електричних пристроїв. Відхилення від неї виникають через нелінійні навантаження, конструкцію генератора та умови експлуатації, що призводить до додаткових частотних компонентів у сигналі. Це може спричинити перегрів обладнання, неправильну роботу чутливих пристроїв, збільшення енерговтрат, резонансні явища та погіршення якості електроенергії. Вирішення цієї проблеми є важливим для забезпечення надійної роботи аварійних джерел живлення.

На рис. 1 наведено форму сигналу напруги синхронного генератора дизельгенераторної установки (ДГУ) при 0 % навантаження, яке є чисто активним.

В ідеальному випадку напруга без навантаження має бути рівномірною

синусоїдою без різких змін форми. Однак отримана осцилограма демонструє виражену

нерівномірність форми хвилі: піки мають неправильну форму, є залом на фронтах хвилі, а також видно значний рівень вищих гармонік. Аналіз форми



кривої напруги виявив такі характеристики: зміна форми піків синусоїди, заломані фронти хвилі, високочастотні коливання у формі хвилі та нестабільність амплітуди напруги.

На рис. 2 наведено вихідний сигнал автоматичного регулятора напруги (AVR) при 0 % навантаження.

Сигнал складається з позитивних імпульсів, розділених періодами відсутності сигналу, що відповідає напівхвильовому виходу плати AVR SX460, яка використовується для регулювання збудження синхронного генератора.



Рисунок 2. Форма сигналу плати AVR при 0 % навантаження

Напівхвильова форма сигналу є типовою для AVR SX460, оскільки вона використовує тиристорну схему регулювання збудження. Це не є несправністю, а є особливістю конструкції плати. Стабільність амплітуди імпульсів свідчить про ефективну роботу системи регулювання збудження при 0 % навантаженні. Невеликі коливання амплітуди можуть бути пов'язані з нелінійністю елементів схеми AVR або з впливом зовнішніх факторів. Це не є несправністю, а є особливістю конструкції плати. Стабільна амплітуда сигналу та відсутність значних спотворень свідчать про те, що плата AVR працює коректно.

На рис. 3 наведено форму сигналу напруги синхронного генератора дизельгенераторної установки (ДГУ) при 50 % навантаження, яке є чисто активним.

Асиметрія та нерівномірність форми хвилі можуть бути спричинені особливостями регулювання збудження та механічними коливаннями обертів привідного двигуна. Осцилограма демонструє частоту 50,8 Гц, що дещо перевищує номінальне значення 50 Гц. Дане відхилення є типовим для дизельгенераторних установок із механічним регулятором обертів паливного насоса високого тиску (ПНВТ). Механічні регулятори не забезпечують абсолютної стабільності обертів двигуна, особливо при зміні навантаження, тому незначні коливання частоти є нормальними.

Рівень напруги залишається в межах номінальних значень, без суттєвих відхилень. Аналіз осцилограми показує, що при 50 % активного навантаження форма сигналу наближається до синусоїди з викривленнями, які можуть бути спричинені особливостями регулювання збудження або механічними флуктуаціями обертів привідного двигуна.

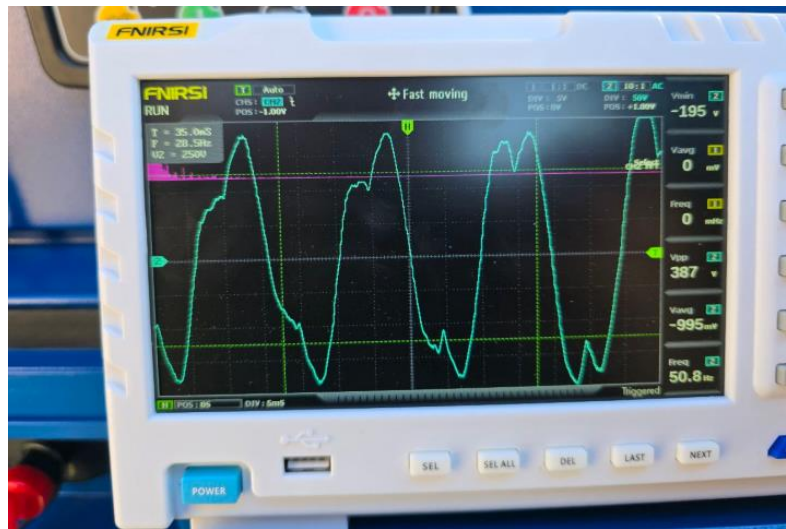


Рисунок 3. Форма кривої напруги синхронного генератора ДГУ при роботі при навантаженні 50 %

На рис. 4 наведено вихідний сигнал автоматичного регулятора напруги (AVR) SX460, який використовується для керування збудженням синхронного генератора дизельгенераторної установки (ДГУ) при 50 % активного навантаження. Ширина та амплітуда імпульсів змінюються відповідно до поточного навантаження генератора, що свідчить про адаптивне регулювання рівня збудження для підтримки стабільної напруги. Частота сигналу становить 51,3 Гц, що є наслідком природних коливань частоти обертання дизельного двигуна під впливом змін навантаження. Відсутність жорсткої стабілізації (як у випадку електронного регулятора обертів) дозволяє короточасні відхилення частоти, що не є критичним для роботи більшості електроспоживачів. За 50 % активного навантаження система автоматично регулює струм збудження, забезпечуючи підтримку стабільної вихідної напруги генератора. У таких умовах AVR формує періодичні імпульси управління збудженням, що видно



Рисунок 4. Форма сигналу плати AVR при 50 % навантаження

на осцилограмі. Відсутність значних спотворень або нестабільності сигналу підтверджує коректну роботу AVR і синхронного генератора.

На рис. 5 наведено форму кривої вихідної напруги синхронного генератора ДГУ при навантаженні 100 % від номінальної потужності, яка має значні спотворення. Хоча плата AVR (наприклад, SX460) працює коректно, ідеальна форма сигналу не підтримується через вплив низки факторів, пов'язаних із роботою генератора та його компонентів.

Осцилограма вихідної напруги ДГУ при 100 % активному навантаженні демонструє значні гармонійні спотворення, які проявляються у вигляді:

- 1.

Нерівномірностей:
Хвиля має нерівні вершини та западини, що вказує на наявність гармонік та інших спотворень.

2. Сплюснення вершин: Вершини хвилі здаються трохи сплюсненими, що може бути пов'язано з нелінійністю навантаження або обмеженнями генератора.

3. Викривлення форми: Загальна форма хвилі відрізняється від ідеальної синусоїди, що свідчить про наявність спотворень.

Причини нерівномірності форми сигналу:

- а) Нестабільність роботи двигуна: Нерівномірність обертання двигуна може призвести до коливань частоти та амплітуди вихідної напруги.

- б) Недосконалість AVR: Автоматичний регулятор напруги (AVR) може не повністю компенсувати зміни навантаження, що призводить до спотворень сигналу.

- в) Механічні вібрації: Механічні вібрації в генераторі можуть впливати на форму сигналу напруги.

- г) Вплив ПНВТ: Механічний паливний насос високого тиску може вносити нерівномірність в роботу двигуна, що відображається на формі вихідного сигналу генератора.

На рис. 6 наведено є значні спотворення форми напруги при повному навантаженні (100 %).

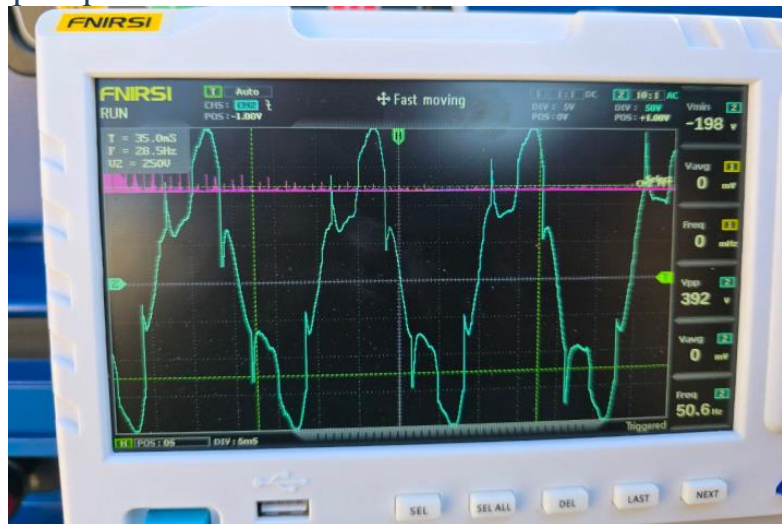


Рисунок 5. Форма кривої напруги синхронного генератора ДГУ при роботі при навантаженні 100 %

Візуальний аналіз осцилограми, отриманої з виходу автоматичного регулятора напруги (AVR) SX460 дизель-генераторної установки при 100 % навантаженні, показує, що замість очікуваного плавного наростання та спаду напруги спостерігаються різкі імпульсні переходи, які мають майже прямокутний характер. Цей феномен є критичним для розуміння динаміки системи.



Рисунок 6. Форма сигналу плати AVR при 100 % навантаження

Ці різкі імпульсні переходи є явним свідченням нестабільності в роботі регулюючої системи або, що ймовірніше, відображають швидке переключення збудження AVR. Таке швидке переключення, ймовірно, зумовлене напівхвильовим тиристорним виходом AVR, який не забезпечує достатньо згладжену зміну вихідної напруги. Напівхвильовий характер вихідного сигналу, властивий тиристорним регуляторам, часто призводить до таких імпульсних перехідних процесів.

На вершинах хвилі, представлених на осцилограмі, чітко видно значні паразитні коливання. Ці коливання можуть бути наслідком кількох факторів, включаючи недостатню фільтрацію вихідного сигналу, або ж вони можуть бути спричинені високочастотними комутаційними процесами, характерними для тиристорного регулятора.

Такі осциляції мають серйозні наслідки, оскільки вони призводять до значних гармонійних спотворень. Це означає, що в напрузі з'являється велика кількість високочастотних складових, які не є бажаними. Ці високочастотні складові можуть викликати перегрів електрообладнання, особливо трансформаторів та двигунів, через збільшення втрат на вихрові струми та гістерезис. Крім того, вони можуть збільшити рівень електромагнітних завад, що може вплинути на роботу чутливих електронних пристроїв, таких як системи управління, комп'ютери та телекомунікаційне обладнання, спричиняючи їх нестабільну роботу або навіть вихід з ладу.

Висновки. У результаті дослідження встановлено, що режим навантаження суттєво впливає на форму вихідної напруги синхронного генератора ДГУ. Виявлено, що при низькому навантаженні спостерігається несинусоїдність форми вихідної напруги через насичення магнітопроводу та нерівномірність роботи системи збудження, тоді як при повному навантаженні відбувається зростання гармонійних спотворень, що може негативно впливати на роботу електроспоживачів.

За результатами дослідження можливо визначити критичні режими роботи генератора та шляхи їх оптимізації. Результати дослідження можуть бути використані для вдосконалення систем керування збудженням, зменшення рівня гармонійних спотворень і підвищення енергоефективності автономних електрогенеруючих установок.

Список використаних джерел

1. Головка В. М. Математичне моделювання автономної вітроелектричної установки з магнітоелектричним генератором / В. М. Головка, М. Я. Островерхов, М. А. Коваленко, І. Я. Коваленко, Д. В. Ципленков // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2022. – № 5. – С. 74–79. DOI: 10.33271/nvngu/2022-5/074.
2. Чумак В. Стабілізація напруги керованого авто-номного магнітоелектричного генератора з магнітним шунтом та збудженням від постійних магнітів / В. Чумак, В. Баженов, О. Тимошук, М. Коваленко, С. Цивінський, І. Коваленко, І. Ткачук // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2020. – № 6(5(114)). – С. 56–62. – ISSN 1729-3774.
3. Островерхов М. Розробка системи керування для зняття максимальної потужності автономної вітроустановки з синхронним магнітоелектричним генератором / М. Островерхов, В. Чумак, М. Коваленко, І. Коваленко // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2022. – № 4(2(118)). – С. 67–78. DOI: 10.15587/1729-4061.2022.263432.
4. IEEE standard definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced, or unbalanced conditions // IEEE Std 1459–2010 (Revision of IEEE Std 1459–2000). – 2010. – pp. 1–50.

References

1. Golovko V. M., Ostroverkhov M. Y., Kovalenko M. A., Kovalenko I. Y. and Tsyplenkov D. V. (2022) Mathematical simulation of autonomous wind electric installation with magnetoelectric generator. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (5), 74–79. URL: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-5/074>. (Ukr).
2. Chumack V., Bazhenov V., Tymoshchuk O., Kovalenko M., Tsyvinskyi S., Kovalenko I. and Tkachuk I. (n.d.). Voltage stabilization of a controlled autonomous magnetoelectric generator with a magnetic shunt and permanent magnet excitation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(5 (114)), 56–62. (Ukr).
3. Ostroverkhov, M., Chumack, V., Kovalenko, M. and Kovalenko, I. (2022) Development of the control system for taking off the maximum power of an autonomous wind plant with a synchronous magnetoelectric generator. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(2(118)), 67–78. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.263432>. (Ukr).
4. IEEE (2010) IEEE standard definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced, or unbalanced conditions (IEEE Std 1459–2010). IEEE.

Andrii Trachuk, PhD student, ORCID <https://orcid.org/0000-0001-8755-605X>,
Maxym Shumeiko, Bachelor student, ORCID <https://orcid.org/0009-0005-0651-2968>,

Scientific supervisor: Dr. Sc. (Eng.), Professor **Stefan Zaichenko**,
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic
Institute”

WAYS TO INCREASE ENERGY SECURITY OF UKRAINE’S ENERGY COMPLEX BY INTENSIFYING THE DEVELOPMENT OF SOLAR ENERGY

ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОБЕЗПЕКИ ЕНЕРГОКОМПЛЕКСУ УКРАЇНИ ШЛЯХОМ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ РОЗВИТКУ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

Abstract. *The current challenges of Ukraine’s energy security are caused by both foreign policy and domestic economic factors. The instability of the supply of traditional energy resources, dependence on imports, the threat of physical destruction of energy infrastructure due to military actions and global climate change force the state to seek long-term solutions to strengthen energy independence. One of the promising areas in this context is the development of renewable energy sources, especially solar energy, which has significant potential due to the natural conditions of Ukraine. The development of solar energy is a strategic step that will contribute not only to increasing energy security, but also to stimulating economic growth. To do this, it is necessary to attract investments, eliminate bureaucratic obstacles, introduce modern energy storage technologies and modernize power grids. In addition, the active use of solar energy will help reduce greenhouse gas emissions, which is important in the context of global environmental challenges and Ukraine’s international obligations regarding decarbonisation.* Ref. 10.

Keywords: energy security, solar energy, renewable energy sources, photovoltaic panels, energy independence, investments, decentralization, innovations.

Анотація. Сучасні виклики енергетичній безпеці України зумовлені як зовнішньополітичними, так і внутрішньоекономічними факторами. Нестабільність постачання традиційних енергоресурсів, залежність від імпорту, загроза фізичного руйнування енергетичної інфраструктури через військові дії та глобальні зміни клімату змушують державу шукати довгострокові рішення для зміцнення енергетичної незалежності. Одним із перспективних напрямків у цьому контексті є розвиток відновлюваних джерел енергії, особливо сонячної, яка має значний потенціал завдяки природним умовам України. Розвиток сонячної енергетики є стратегічним кроком, який сприятиме не тільки підвищенню енергетичної безпеки, а й стимулюванню економічного зростання. Для цього необхідно залучити інвестиції, усунути бюрократичні перешкоди, запровадити сучасні технології зберігання енергії та модернізувати електромережі. Крім того, активне використання сонячної енергії сприятиме зменшенню викидів парникових газів, що важливо в контексті глобальних екологічних викликів та міжнародних зобов’язань України щодо декарбонізації. Бібл. 10.

Keywords: енергетична безпека, сонячна енергетика, відновлювані джерела енергії, фотоелектричні панелі, енергонезалежність, інвестиції, децентралізація, інновації.

Introduction. Ukraine has been facing large-scale challenges in the field of energy security for a long time, which are becoming more acute and complex every year. The escalation of military operations in the country, the rise in prices for traditional energy sources, the need for significant imports of energy resources, as well as the physical and moral obsolescence of a significant part of the energy infrastructure cause critical dependence on external suppliers and instability of the energy sector as a whole. In the context of global changes and increasing energy risks, Ukraine is faced with an urgent need to find alternative solutions that can ensure stability, autonomy and long-term energy independence.

One of the most promising areas for strengthening the energy sector is the active development of renewable energy, in particular solar energy. Solar energy has the potential to become not only a tool for reducing dependence on fossil fuel imports, but also a fundamental driver of economic growth. The implementation of large-scale projects in this area contributes to the creation of new jobs, stimulates the development of related industries, and promotes the inflow of foreign and domestic investments. Due to its geographical and climatic features, Ukraine has all the prerequisites for using solar energy as a powerful factor in ensuring energy stability and sustainable development of the country.

In addition to economic benefits, the development of solar energy plays a key role in reducing the negative impact on the environment, reducing greenhouse gas emissions and reducing air pollution. This not only corresponds to global environmental trends, but also acquires particular importance for Ukraine, which seeks to integrate into the European energy space and meet international standards in the field of environmental policy [1].

Therefore, the transition to the active use of solar energy is not just a technological or economic choice, but a strategic decision that determines the future of Ukraine's energy security. In this context, it is necessary to consider not only the technical aspects of the implementation of solar power plants, but also the legal, financial and social mechanisms that can help accelerate this process. Only a comprehensive approach that takes into account all these factors is able to provide Ukraine with a sustainable and independent energy future.

Purpose and objectives of the study. The main goal of this study is to identify effective ways to strengthen Ukraine's energy security by accelerating the development of solar energy. Achieving this goal involves a comprehensive approach to analyzing the current state of the industry, identifying obstacles that hinder its growth, and formulating recommendations for the accelerated implementation of solar technologies in the national energy system.

To achieve this goal, the following key tasks have been identified:

- to investigate the current state of solar energy in Ukraine, including its technical potential, level of infrastructure development, and regulatory framework;
- identify the main factors hindering the expansion of this industry, including economic, technical, legislative and social barriers;
- analyze global experience in supporting and stimulating the development of renewable energy, identify best practices that can be adapted for Ukraine;

- develop a set of measures that will contribute to the accelerated implementation of solar power plants, including improving the regulatory framework, financial support mechanisms, and innovative technological solutions;
- assess potential sources of financing for solar energy projects and consider the prospects for attracting both public and private investment.

Completing these tasks will allow us to obtain sound conclusions and develop practical recommendations for the accelerated development of solar energy as a strategic tool for ensuring energy independence and sustainable economic growth of Ukraine.

Presentation of the main material and results. Ukraine has a huge, yet under-utilized potential for the development of solar energy. The southern and central regions of the country are particularly promising, where the level of solar insolation ensures efficient electricity generation for a significant part of the year. However, despite these favorable conditions, the pace of development of the industry remains below potential due to a number of barriers that limit the large-scale implementation of solar power plants (SPPs) both at the commercial and household levels [1–3].

The main obstacles to the development of solar energy in Ukraine:

- regulatory instability and legal difficulties. One of the main problems that deters investors is the variability of legislative norms. Changes in the conditions for supporting renewable energy, unpredictable adjustments to the “green tariff”, complex bureaucratic procedures for obtaining permits create uncertainty and reduce business interest in investing in this sector. In addition, the lack of a long-term energy strategy with clear commitments to support RES (renewable energy sources) further exacerbates the situation;
- financial barriers and limited access to investment. The high cost of initial investments in the construction of solar power plants remains one of the key challenges. Despite the decline in the cost of solar panels on the global market, access to credit resources for Ukrainian companies and households is limited. The lack of favorable credit programs and the insufficient level of state subsidies make project implementation difficult, especially for small and medium-sized businesses;
- technological difficulties and challenges of energy storage. Solar energy has one of the main features – its production is uneven, as it depends on the time of day and weather conditions. Since Ukraine does not yet have a developed infrastructure for effective electricity storage (for example, modern battery stations or hydrogen storage technologies), the integration of a large amount of solar capacity into the overall energy system becomes a serious technical problem;
- deterioration of power grids and insufficient capacity. Ukrainian power grids are significantly deteriorated, which makes it difficult to connect new solar power plants and balance the power system. Many regions do not have sufficient capacity to distribute additional electricity, which forces power system operators to limit the connection of new solar power plants.

Ways to solve problems and accelerate the development of solar energy

To overcome the listed challenges, a comprehensive approach is needed, including reforming the legislative framework, stimulating investments, supporting innovative solutions, and modernizing the energy infrastructure:

- development of a long-term state strategy with clear mechanisms for supporting solar energy. Ukraine needs a predictable and stable policy in the field of renewable energy, which will provide clear conditions for support for investors, protection of existing contracts and guarantees for new market players. Regulatory stability will become the basis for the growth of the industry;
- introduction of affordable financial instruments. The creation of public and private preferential credit programs for small and medium-sized businesses implementing solar power plants will contribute to the growth of the sector. It is also necessary to develop mechanisms to compensate for part of the costs of installing solar panels for households [4–7];
- stimulating local production of solar energy components. Developing domestic production of solar panels, inverters, and battery systems will reduce dependence on imports and create additional jobs in the country;
- introduction of modern energy storage technologies and balancing of the power system. It is necessary to develop energy storage infrastructure, implement large-scale battery stations and hydrogen storage technologies. This will allow efficient use of energy stored during peak production periods and ensure the stability of electricity supply;
- modernization of power grids and expansion of their capacity. An important task is to upgrade the national power grid and create smart grids that can effectively integrate distributed generation from solar power plants;
- development of mechanisms of “energy cooperatives”. One of the promising directions is the creation of local energy cooperatives, which will allow combining the financial resources of households and enterprises for the construction of joint solar power plants. This will increase the accessibility of solar energy for the general public [8–14].

Solar energy has the potential to become a key component of Ukraine’s energy independence. However, for its dynamic development, it is necessary to remove regulatory, financial, technological and infrastructure barriers. Attracting investment, developing new technologies, supporting local production and modernizing power grids can become driving factors that will ensure an accelerated transition to a sustainable and environmentally friendly energy system in the country.

Conclusions. The development of solar energy in Ukraine is not just one of the directions of modernization of the energy sector, but a strategic necessity that directly affects the energy security, economic stability and environmental sustainability of the country. In modern geopolitical conditions, when the issue of energy independence is gaining critical importance, the active implementation of solar power plants (SPPs) can become one of the key levers for reducing dependence on imported energy resources. This will not only reduce the costs of

purchasing gas, coal or oil, but also create conditions for the development of its own energy sector, attracting investments and increasing the level of technological innovation of the country.

The rapid expansion of solar energy will ensure a stable and predictable supply of electricity, especially in remote regions where access to traditional energy sources can be difficult. Moreover, decentralizing electricity production through local solar plants minimizes the risks of energy crises associated with damage to centralized infrastructure or interruptions in the supply of energy resources.

From an economic point of view, the large-scale implementation of solar power plants will contribute to the creation of new jobs, the development of related industries, including the production of solar panels, inverters, energy storage systems and other related equipment. This will contribute to the expansion of opportunities for small and medium-sized businesses, allowing enterprises and private households not only to reduce electricity costs, but also to receive additional income from the sale of excess energy produced.

However, realizing this potential requires a comprehensive approach that includes several key aspects:

- legislative stability and regulatory predictability. Ukraine needs a consistent state policy in the field of renewable energy, which will not undergo frequent changes and will provide long-term guarantees for investors. The legislative framework should facilitate the development of solar power plants, and not create bureaucratic and regulatory barriers;

- financial support and access to credit. It is important to develop and implement government support programs that will provide preferential financing for the construction of solar power plants, especially for households and small businesses. Access to cheap loans, tax breaks, and subsidies will contribute to faster development of the sector;

- innovative solutions and development of energy storage technologies. Effective integration of solar energy into the national energy system requires infrastructure modernization and the introduction of modern energy storage technologies, such as powerful battery systems or hydrogen technologies;

- modernization of power grids and decentralization of the energy system. Old and worn-out energy infrastructure is one of the key challenges hindering the development of solar energy. Its renovation and expansion of network capacity will avoid system overload and ensure more effective integration of new energy sources;

- community engagement and support. It is important to raise public awareness of the benefits of using solar energy and develop mechanisms for energy cooperatives that will allow pooling resources for the construction of local solar power plants.

Only with active interaction of the state, business and society can we achieve the most effective use of solar energy and make this sector not only environmentally appropriate, but also economically beneficial for all participants.

A comprehensive development policy focused on long-term prospects can not only significantly increase the share of solar energy in the country's energy balance, but also ensure real energy independence for Ukraine.

References

1. International Energy Agency (2023) "Renewable Energy Market Update: Outlook for 2023 and 2024". URL: <https://www.iea.org/reports/renewable-energy-market-update-may-2023> (accessed 15.03.2025).
2. International Renewable Energy Agency (2023) "Renewable Energy Capacity Statistics 2023". URL: <https://www.irena.org/Publications/2023/Mar/Renewable-capacity-statistics-2023> (accessed 15.03.2025).
3. World Bank (2023) "Scaling Up Renewable Energy in Developing Countries: Challenges and Opportunities". URL: <https://www.worldbank.org/en/topic/energy/publication/scaling-up-renewable-energy-in-developing-countries> (accessed 15.03.2025).
4. BloombergNEF (2023) "New Energy Outlook 2023". URL: <https://about.bnef.com/new-energy-outlook> (accessed 15.03.2025).
5. REN21 (2023) "Renewables 2023 Global Status Report". URL: <https://www.ren21.net/reports/global-status-report> (accessed 15.03.2025).
6. International Energy Agency (2023) "Ukraine Energy Profile". URL: <https://www.iea.org/reports/ukraine-energy-profile> (accessed 15.03.2025).
7. International Renewable Energy Agency (2023) "Renewable Energy Prospects for Ukraine". URL: <https://www.irena.org/publications/2023/Jan/Renewable-Energy-Prospects-for-Ukraine> (accessed 15.03.2025).
8. European Bank for Reconstruction and Development (2023) "Ukraine's Solar Energy Potential: Opportunities and Challenges". URL: <https://www.ebrd.com/news/2023/ukraines-solar-energy-potential-opportunities-and-challenges.html> (accessed 15.03.2025).
9. United Nations Development Programme (2023) "Enhancing Energy Security in Ukraine through Renewable Energy Development". URL: https://www.ua.undp.org/content/ukraine/en/home/library/democratic_governance/enhancing-energy-security-in-ukraine-through-renewable-energy-de.html (accessed 15.03.2025).
10. National Renewable Energy Laboratory (2023) "Solar Resource Assessment for Ukraine". URL: <https://www.nrel.gov/docs/fy23osti/solar-resource-assessment-ukraine.pdf> (accessed 15.03.2025).
11. World Economic Forum (2023) "The Future of Energy: Innovations and Policy Trends". URL: <https://www.weforum.org/reports/the-future-of-energy-2023> (accessed 15.03.2025).
12. United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) (2023) "Climate Action and Renewable Energy: Global Commitments". URL: <https://unfccc.int/climate-action/renewable-energy> (accessed 15.03.2025).
13. International Renewable Energy Agency (2023) "Hydrogen: A Renewable Energy Perspective". URL: <https://www.irena.org/publications/2023/Apr/Hydrogen-A-Renewable-Energy-Perspective> (accessed 15.03.2025).
14. International Energy Agency (2023) "Offshore Wind Outlook 2023". URL: <https://www.iea.org/reports/offshore-wind-outlook-2023> (accessed 15.03.2025).

Список використаних джерел

1. Міжнародне енергетичне агентство (2023) "Оновлення ринку відновлюваної енергії: перспективи на 2023 та 2024 роки". URL: <https://www.iea.org/reports/renewable-energy-market-update-may-2023> (дата звернення 15.03.2025).

2. Міжнародне агентство з відновлюваної енергії (2023) “Статистика відновлюваних джерел енергії 2023”. URL: <https://www.irena.org/Publications/2023/Mar/Renewable-capacity-statistics-2023> (дата звернення 15.03.2025).
3. Світовий банк (2023) “Збільшення відновлюваної енергетики в країнах, що розвиваються: виклики та можливості”. URL: <https://www.worldbank.org/en/topic/energy/publication/scaling-up-renewable-energy-in-developing-countries> (переглянуто 15.03.2025).
4. BloombergNEF (2023) “Нова енергетична перспектива 2023”. URL: <https://about.bnef.com/new-energy-outlook> (дата звернення 15.03.2025).
5. REN21 (2023) “Звіт про глобальний стан відновлюваних джерел енергії 2023”. URL: <https://www.ren21.net/reports/global-status-report> (дата звернення 15.03.2025).
6. Міжнародне енергетичне агентство (2023) “Енергетичний профіль України”. URL: <https://www.iea.org/reports/ukraine-energy-profile> (дата звернення 15.03.2025).
7. Міжнародне агентство з відновлюваної енергії (2023) “Перспективи відновлюваної енергетики в Україні”. URL: <https://www.irena.org/publications/2023/Jan/Renewable-Energy-Prospects-for-Ukraine> (дата звернення 15.03.2025).
8. Європейський банк реконструкції та розвитку (2023) “Потенціал сонячної енергетики України: можливості та виклики”. URL: <https://www.ebrd.com/news/2023/ukraines-solar-energy-potential-opportunities-and-challenges.html> (дата звернення 15.03.2025).
9. Програма розвитку ООН (2023) “Підвищення енергетичної безпеки в Україні шляхом розвитку відновлюваної енергетики”. URL: https://www.ua.undp.org/content/ukraine/en/home/library/democratic_governance/enhancing-energy-security-in-ukraine-through-renewable-energy-de.html (дата звернення 15.03.2025).
10. Національна лабораторія відновлюваної енергетики (2023) “Оцінка сонячних ресурсів для України”. URL: <https://www.nrel.gov/docs/fy23osti/solar-resource-assessment-ukraine.pdf> (дата звернення 15.03.2025).
11. Всесвітній економічний форум (2023) “Майбутнє енергетики: інновації та політичні тенденції”. URL: <https://www.weforum.org/reports/the-future-of-energy-2023> (дата звернення 15.03.2025).
12. Рамкова конвенція ООН про зміну клімату (РКЗК ООН) (2023) “Кліматичні дії та відновлювані джерела енергії: глобальні зобов'язання”. URL: <https://unfccc.int/climate-action/renewable-energy> (дата звернення 15.03.2025).
13. Міжнародне агентство з відновлюваної енергії (2023) “Водень: перспектива відновлюваної енергії”. URL: <https://www.irena.org/publications/2023/Apr/Hydrogen-A-Renewable-Energy-Perspective> (дата звернення 15.03.2025).
14. Міжнародне енергетичне агентство (2023) “Офшорна вітрова перспектива 2023”. URL: <https://www.iea.org/reports/offshore-wind-outlook-2023> (дата звернення 15.03.2025).

Козловський Є. В., аспірант, ORCID 0009-0009-2753-3900,
науковий керівник: д-р техн. наук, професор **А. В. Волошко**,
Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

ВИЗНАЧЕННЯ ДЖЕРЕЛА ПРОВАЛУ НАПРУГИ ВІДНОСНО МЕЖІ БАЛАНСОВОЇ НАЛЕЖНОСТІ

DETERMINATION OF THE VOLTAGE DIP SOURCE RELATIVE TO THE BORDER OF RESPONSIBILITY

Анотація. Представлено спосіб визначення розташування провалу напруги відносно межі балансової належності. Напрямок пошкодження визначається розробленим направляючим елементом повного опору зворотної послідовності напруги. При прямому напрямку пошкодження повний опір зворотної послідовності завжди негативний, а при зворотному – завжди позитивний. Бібл. 2, рис. 2.

Ключові слова: симетричні послідовності напруги, полярні координати, типи провалів напруги.

Abstract. A method for determining the location of a voltage dip relative border of responsibility is described in this article. The direction of the damage is determined by the developed directional element of the negative sequence impedance. In the case of a direct damage direction, the negative sequence impedance is always negative, and in the case of a reverse damage direction, it is always positive. Ref. 2, Fig. 2.

Keywords: symmetrical voltage sequences, polar coordinates, types of voltage dips.

Вступ. Провали напруги є дуже важливим показником якості електричної енергії (ЯЕЕ) для сучасного виробництва, насиченого електронними системами керування. Вони можуть спричиняти серйозні порушення в роботі чутливих приладів, таких як комп'ютери, програмовані логічні контролери (ПЛК), системи автоматизації, електроприводи з частотними перетворювачами та інше обладнання. Вплив провалів напруги на обладнання може проявлятися у вигляді його тимчасового відключення, втрати даних, помилок у роботі контролерів, збою в роботі електронних систем, або навіть пошкодження обладнання. Це може призводити до простоїв виробництва, втрат продуктивності та додаткових витрат на обслуговування та ремонт.

Причиною появи провалів напруги є різкі зміни режиму – короткі замикання, пускові струми при включенні потужних асинхронних двигунів, підключення потужних однофазних навантажень.

Для будь-якого підприємства причини виникнення провалів напруги можна розділити на зовнішні та внутрішні. Визначення приналежності провалу напруги до будь-якої групи має істотне значення при оцінці відповідальності за виникнення збитків від порушення технологічного циклу. Невизначеність розташування провалу напруги призводить до правових суперечок між споживачами електричної енергії та її постачальниками.

Метою досліджень є розробка методики визначення місця розташування джерела провалу напруги відносно межі балансової належності шляхом аналізу повного опору зворотної послідовності напруги. Це дозволить точно визначати напрямок пошкодження, зменшити кількість правових суперечок між споживачами та постачальниками електроенергії, а також покращити надійність електропостачання за рахунок оперативного виявлення та усунення причин провалів напруги.

Матеріал і результати досліджень. Одними із небагатьох вітчизняних вчених, які поспробували вирішити це питання – хто винуватець в появі провалу напруги – споживач електричної енергії або постачальник, були О. Г. Гриб та Г. А. Сендерович [1]. Вони запропонували метод автоматичного визначення положення джерела провалу напруги відносно межі балансової належності.

При визначенні місця розташування короткого замикання на живильній лінії чи у споживача можна скористатися кутовими характеристиками струму.

Якщо направити вектор фазної напруги на шинах прийомної підстанції по уявній осі комплексної площині, то вектор фазного струму лінії буде розташовуватися в IV квадранті (для лінії 110 кВ кут складе $\varphi = 70^\circ$). При розташуванні точки короткого замикання у споживача, якщо допустити, що характер мережі практично той же, струм буде мати протилежний напрямок. При цьому кут зміниться на 180° ($\varphi = 70^\circ + 180^\circ$). Автори в [1] роблять висновок: коротке замикання розташоване з боку лінії, якщо $\cos\varphi > 0$ ($|\varphi| < \pi/2$).

Коротке замикання розташовано з боку підприємства, якщо $\cos\varphi < 0$ ($|\varphi| < \pi/2$).

Відмічаючи той факт, що кутові характеристики при коротких замиканнях у внутрішній мережі підприємства можуть істотно відрізнятися від кутових характеристик при коротких замиканнях у зовнішніх мережах у силу неоднорідності мереж різних ступеней номінальних напруг, це може вплинути на кутові характеристики і привести до суттєвих похибок.

В зв'язку з цим, в даній роботі напрямок пошкодження визначається розробленим направляючим елементом повного опору зворотної послідовності напруги.

Розглянемо типове замикання на землю, провал типу В. Основні характеристики змодельованої системи в полярних координатах:

$$\begin{aligned} u_a &= h \cdot U \angle 0^\circ \\ u_b &= U \angle -120^\circ, \\ u_c &= U \angle 120^\circ, \end{aligned} \tag{1}$$

при цьому $h = 0,8$ – глибина провалу, $U = 220$ В.

Визначимо пряму та зворотну послідовності напруг.

Пряма послідовність:

$$U_{\text{пр}} = \frac{1}{3} \cdot (176 \angle 0^\circ + 1 \angle 120^\circ \cdot 220 \angle -120^\circ + 1 \angle 240^\circ \cdot 220 \angle 120^\circ) =$$

$$= \frac{1}{3} \cdot (176 \angle 0^\circ + 220 \angle 0^\circ + 220 \angle 0^\circ) = 205 \angle 0^\circ \text{ В.} \quad (2)$$

Зворотна послідовність:

$$U_{\text{зв}} = \frac{1}{3} \cdot (176 \angle 0^\circ + 1 \angle 240^\circ \cdot 220 \angle -120^\circ + 1 \angle 120^\circ \cdot 220 \angle 120^\circ) =$$

$$= \frac{1}{3} \cdot (176 \angle 0^\circ + 220 \angle 120^\circ + 220 \angle 240^\circ) = 15 \angle 180^\circ \text{ В.} \quad (3)$$

Висновок. При замиканні фази А на землю (тип провалу напруги В):

- пряма послідовність напруги зменшується до $205 \angle 0^\circ$;
- зворотна послідовність напруги становить $15 \angle 180^\circ$, тобто відстає на $\angle 180^\circ$ від прямої послідовності.

На рис. 1 наведено трифазну незбалансовану напругу електричної мережі, пряма, зворотна та нульова послідовності.

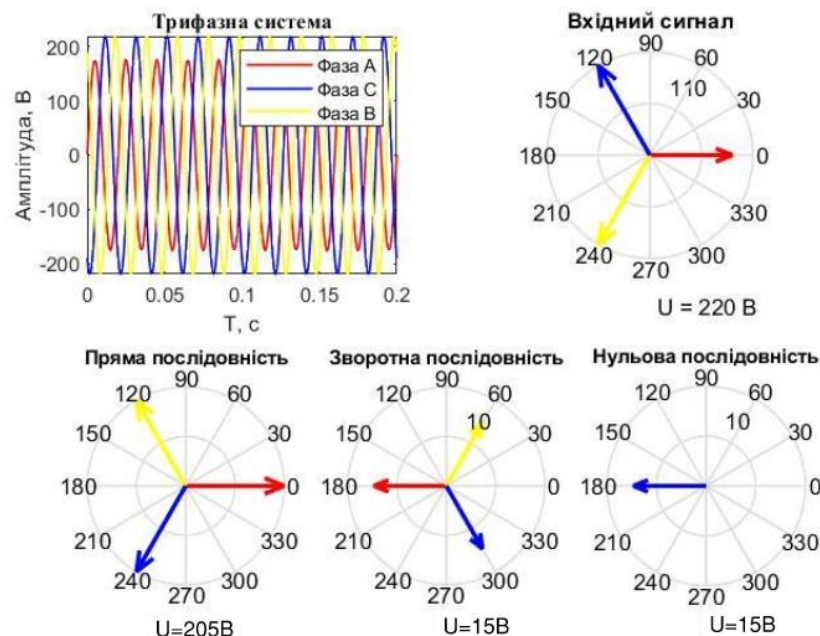


Рисунок 1. Трифазна напруга (провал типу В), пряма, зворотна та нульова послідовності

Як відомо, зворотна послідовність є однією з трьох складових, що використовуються в аналізі симетричних послідовностей трифазних енергосистем. Метод симетричних послідовностей дозволяє визначати

небалансні режими у трифазній системі, використовуючи лише однофазні розрахунки. Це значно спрощує процес визначення струмів і напруг під час міжфазних, однофазних та двофазних замикань на землю в енергосистемах.

Оскільки зворотна та нульова послідовності виникають у значних випадках лише при аварійних режимах, вони часто використовуються для визначення наявності пошкодження в енергосистемі. Зворотна послідовність використовується для виявлення міжфазних, однофазних та двофазних замикань на землю. Нульова послідовність використовується для виявлення однофазних та двофазних замикань на землю.

В загальному вигляді для розрахунку прямої та зворотної послідовностей застосовуються наступні формули:

$$U_{\text{пр}} = 1/3 \cdot (U_A + aU_B + a^2U_C), \quad (4)$$

$$U_{\text{зв}} = 1/3 \cdot (U_A + a^2U_B + aU_C), \quad (5)$$

$$a = -1/2 + j\sqrt{3}/2.$$

Множення вектору на “а” обертає цей вектор на 120° проти годинникової стрілки. Якщо оператор “а” в квадраті, він стає $1 \angle 240^\circ$, що відповідає обертанню вектору на 240° проти годинникової стрілки.

Для визначення напрямку пошкодження використовується так званий направляючий елемент зворотної послідовності – мається на увазі елемент, який аналізує напругу $U_{\text{зв}}$ послідовності на лінії електропередачі та струм зворотної послідовності, що протікає через цю лінію. Далі ці величини порівнюються за їх відносними фазовими кутами.

Умови визначення пошкодження при цьому наступні. Пошкодження в прямому напрямку фіксується тільки тоді, коли струм зворотної послідовності випереджає напругу зворотної послідовності на 180° мінус характеристичний кут лінії [2]:

$$T_{32Q} = |U_{\text{зв}}| \cdot |I_{\text{зв}}| \cdot \cos (\angle(-U_{\text{зв}}) - (\angle I_{\text{зв}} + MTA)), \quad (6)$$

де T_{32Q} – крутний момент направляючого елемента зворотної послідовності, ВА;

MTA – характеристичний кут лінії електропередачі, град.

Якщо T_{32Q} – додатне, то пошкодження знаходиться в прямому напрямку.

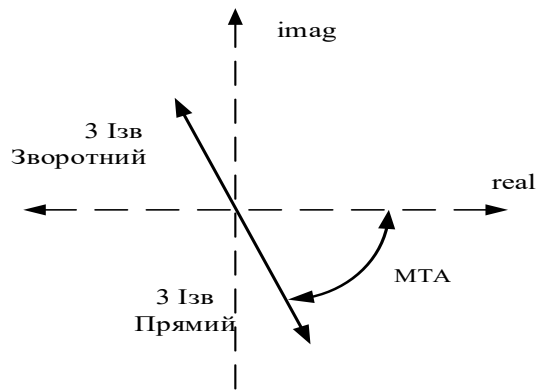


Рисунок 2. Характеристики традиційного направляючого елементу зворотної послідовності [2]

Приймаємо, що струм фази А буде відставати від напруги фази А на МТА. При цьому приймемо спрощення, що $МТА = 90^\circ$. Отже струм фази А з кутом $\angle -90^\circ$. Тобто, струм фази А буде відставати від напруги фази А на $\angle -90^\circ$ з амплітудою 12 А.

У зв'язку з цим обчислюємо струм зворотної послідовності для короткого замикання.

Дані: $I_a = 12\angle 90^\circ \text{ A}$, $I_b = 0 \text{ A}$, $I_c = 0 \text{ A}$,

$$\begin{aligned} I_{зв} &= \frac{1}{3} \cdot (I_a + 1\angle 240^\circ \cdot I_b + 1\angle 120^\circ \cdot I_c) = \\ &= \frac{1}{3} \cdot (12\angle -90^\circ + 1\angle 240^\circ \cdot 0 + 1\angle 120^\circ \cdot 0) = \\ &= \frac{1}{3} \cdot (12\angle -90^\circ) = 4\angle 90^\circ \text{ A}. \end{aligned} \quad (7)$$

Таким чином отримали, що струм зворотної послідовності становить третину струму фази А і має той самий фазовий кут.

Ми отримали всі необхідні дані для визначення крутного моменту для традиційного направляючого елементу зворотної послідовності.

Вихідні дані: $U_{зв} = 15\angle 180^\circ \text{ В}$; $I_{зв} = 4\angle -90^\circ \text{ А}$.

Обчислимо за формулою:

$$\begin{aligned} T_{32Q} &= |U_{зв}| \cdot |I_{зв}| \cdot \cos(\angle(-U_{зв}) - (\angle I_{зв} + МТА)) = \\ &= |15\angle 180^\circ| \cdot |4\angle -90^\circ| \cdot \cos(\angle(-180^\circ) - (-90^\circ + 90^\circ)) = -60 \text{ ВА}. \end{aligned} \quad (8)$$

Висновок. Крутний момент від'ємний – пошкодження в зворотному напрямку.

Примітка. Розрахунок для прямого замикання аналогічний зворотному замиканню. Усі параметри мережі залишаються незмінними, окрім струму

фази А, який буде зміщений на 180° відносно попереднього випадку. Це призведе до позитивного моменту, що означатиме прямий напрямок пошкодження.

Формула для обчислення повного опору зворотної послідовності:

$$Z_2 = Z_{3B} = U_{3B} / I_{3B}. \quad (9)$$

Як ми бачили раніше, напруга зворотної послідовності при пошкодженні завжди зворотня (у нашому прикладі $U_{3B} = 15 \angle 180^\circ$, або -15 В).

При пошкодженні у прямому напрямку струм зворотної послідовності відстає від напруги на характеристичний кут лінії МТА і вважається додатним. Наприклад, при прямому замиканні $I_{3B} = 4 \angle -90^\circ$. При пошкодженні у зворотному напрямку струм зворотної послідовності зміщується на 180° відносно випадку прямого замикання і вважається від'ємним. При зворотному замиканні $I_{3B} = 4 \angle 90^\circ$.

Оскільки U_{3B} завжди негативне, а I_{3B} позитивне при прямому замиканні та негативне при зворотному, можна зробити висновок: при прямому пошкодженні $Z_2 = Z_{3B}$ завжди негативне, при зворотному – завжди позитивне.

Приклади розрахунків повного опору.

Прямий напрямок:

$$Z_2 = Z_{3B} = U_{3B} / I_{3B} = 15 \angle 180^\circ / 4 \angle -90^\circ = 3.75 \angle 270^\circ \text{ Ом}; \quad Z_2 = -3.75 \text{ Ом}. \quad (10)$$

Зворотній напрямок:

$$Z_2 = Z_{3B} = U_{3B} / I_{3B} = 15 \angle 180^\circ / 4 \angle 90^\circ = 3.75 \angle 90^\circ \text{ Ом}; \quad Z_2 = +3.75 \text{ Ом}. \quad (11)$$

Висновки.

1. Розроблений підхід до визначення місця розташування провалів напруги відносно межі балансової належності показав свою ефективність і незалежність від кутових характеристик як зі сторони постачальника електроенергії, так і її споживача.

2. Застосування даного способу визначення місця розташування джерела провалу дозволить зменшити кількість правових суперечок між споживачами і постачальником електроенергії.

Список використаних джерел

1. Гриб О. Г., Сендерович Г. А., Щербакова П. Г., Яров Х. Автоматичне визначення місця розташування джерела провалу напруги.
2. Bill Fleming. Negative-Sequence Impedance Directional Element. 10th Annual ProTest User Group Meeting Pasadena, California February 24–26, 1998. URL: <https://selinc.com/api/download/2475?id=2475> (дата звернення 04.03.2025).

References

1. Hryb O. H., Senderovych H. A., Shcherbakova P. H., Yarov Kh. Automatic Determination of Voltage Sag Source Location. (Ukr).
2. Bill Fleming. Negative-Sequence Impedance Directional Element. 10th Annual ProTest User Group Meeting, Pasadena, California, February 24–26, 1998. URL: <https://selinc.com/api/download/2475?id=2475> (accessed 04.03.2025).

УДК 681.5

Бу Дзя Вей, магістрант, ORCID 0009-0000-0582-9836,
науковий керівник: канд. техн. наук, доцент **А. В. Торопов**,
Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ЛІТАЛЬНИМ АПАРАТОМ ТИПУ FLY-BY-WIRE НА ОСНОВІ МОДЕЛІ ПРОГНОЗНОГО УПРАВЛІННЯ

DESIGN OF A FLY-BY-WIRE AIRCRAFT CONTROL SYSTEM BASED ON A PREDICTIVE CONTROL MODEL

Анотація. Система fly-by-wire відіграє ключову роль у сучасних літаках і технології автономного водіння, а її характеристики керування безпосередньо впливають на стабільність і безпеку літака. З огляду на недоліки традиційних методів управління при роботі з обмеженнями і динамічними реакціями, в даній роботі запропонована розрахункова схема системи fly-by-wire на основі моделі прогнозного управління. Встановлено модель поздовжньої динаміки літального апарату, а для моделювання системи використовується метод “стан-простір”. Вводиться модель стратегії прогнозного керування, побудована цільова функція оптимізації, а для вирішення оптимального входу керування використовується метод квадратичного програмування. З метою перевірки ефективності запропонованого методу на базі MATLAB Simulink побудована математична модель, а експериментальне дослідження здійснюється у порівнянні із ПД – регулятором. Результати показують, що модель прогнозного керування може підвищити точність керування та здатність динамічного реагування системи fly-by-wire, і в той же час відповідати вимогам до вхідних обмежень, що забезпечує теоретичну та інженерну підтримку інтелектуального управління літальними апаратами. Бібл. 5.

Ключові слова: Модель прогнозного керування (MPC), дрова система керування, поздовжнє керування літальними апаратами, імітаційне дослідження.

Abstract. The fly-by-wire control system plays a key role in modern aircraft and autonomous driving technology, and its control performance directly affects the stability and safety of aircraft. In view of the shortcomings of traditional control methods in dealing with constraints and dynamic responses, this paper proposes a design scheme for fly-by-wire control system

based on model predictive control. The longitudinal dynamics model of the aircraft is established, and the state-space method is used to model the system. The model predictive control strategy is introduced, the optimization objective function is constructed, and the quadratic programming method is used to solve the optimal control input. In order to verify the effectiveness of the proposed method, a simulation environment is built based on MATLAB Simulink, and the simulation experiment is compared with PID control. The results show that the model predictive control can improve the control accuracy and dynamic response ability of the fly-by-wire control system, and at the same time meet the input constraint requirements, which provide theoretical and engineering support for the intelligent control of the aircraft. Ref. 5.

Keywords: Model Predictive Control (MPC), Fly-by-wire control system, Aircraft longitudinal control, Simulation experiments.

Вступ. Суть системи fly-by-wire полягає в точному управлінні положенням і траєкторією літака, а моделювання поздовжньої динаміки є основою проєктування системи управління. Поздовжня динаміка в основному описує стан руху літака вздовж напрямку тангажу, включаючи такі змінні, як кут атаки (α), кут тангажу (θ) і швидкість зміни кута тангажу (q). У бездротових системах кут відхилення керма (наприклад, кут регулювання висоти) є основним входом керування, який керує рухом за кутом тангажу, впливаючи на аеродинамічний момент. Аеродинамічний момент можна апроксимувати як пропорційну залежність. Проте при цьому саме динамічний тиск, опорна зона, середня довжина аеродинамічної хорди та коефіцієнт моменту тангажу, які пов'язані з кутом атаки, швидкістю зміни кута тангажу та кутом відхилення керма, а точне встановлення поздовжньої динамічної моделі є змінними координатами, що не в повній мірі можуть бути скомпенсовані стандартними ПІД – регуляторами. Відповідно, це є передумовою подальшої вдосконаленням контролерів керування літальним апаратом, в тому числі з використанням методів прогнозного керування моделлю (MPC).

Мета і завдання досліджень. Метою даного дослідження є розроблення системи керування літальним апаратом за технологією з fly-by-wire з використанням технологій прогнозного керування за еталонною моделлю. Для досягнення поставленої мети було вирішено наступні завдання:

1. Сформулювати основні вимоги до системи керування літаком з технологією з fly-by-wire.
2. Надати аналітичний опис прогнозного регулятора.
3. Порівняти отримані результати із типовими ПІД–регуляторами.

Матеріал і результати досліджень. Поздовжня динаміка літального апарату може бути встановлена за допомогою рівнянь Ньютона-Ейлера, які можна виразити у вигляді:

$$\begin{aligned}\dot{V} &= -\frac{D}{m} + g\sin\theta + \frac{T}{m}\cos\alpha, \\ \dot{\alpha} &= q - \frac{g}{V}\cos\theta, \\ \dot{q} &= \frac{M}{I_y}, \\ \dot{\theta} &= q.\end{aligned}\tag{1}$$

В математичній моделі задіяні значення параметрів як швидкість, опір, маса літака, прискорення під дією сили тяжіння, тяга, момент у напрямку тангажу та момент інерції навколо поперечної осі. Ці рівняння описують поздовжню динаміку літального апарату і дають математичну основу для проєктування системи управління.

У бездротових системах кут відхилення керма висоти є основним входом керування, який керує рухом тангажу, впливаючи на аеродинамічний момент M . Аеродинамічний момент може бути апроксимований наступним виразом:

$$M = qSc\bar{C}_m. \quad (2)$$

тобто залежить від динамічного тиску, опорної зони, середньої довжини аеродинамічної хорди та коефіцієнту моменту тангажу, які пов'язані з кутом атаки, швидкістю кута тангажу та кутом відхилення керма, а точне встановлення поздовжньої динамічної моделі є передумовою подальшої конструкції контролера.

З метою полегшення процедури оптимізації системи з використанням методів прогнозного керування моделлю (MPC), рівняння поздовжньої динаміки літального апарату зазвичай перетворюють у стандартну форму простору станів, а саме:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu, \\ y &= Cx + Du. \end{aligned} \quad (3)$$

В математичному рівнянні введено наступні позначення: A – матриця стану системи, B – вхідна матриця керуючих впливів, C – вихідна матриця, D – матриця прямої передачі керуючих впливів. Для поздовжньої динаміки літального апарату матриці матричної системи рівнянь (3) можуть бути представлені наступним чином:

$$x = \begin{bmatrix} \alpha \\ q \\ \theta \end{bmatrix}, \quad u = \delta_e, \quad y = \theta.$$

За умови виконання припущення щодо малості збурень, що діють на об'єкт керування, форму моделі простору станів, для якої може бути вирішена задача оптимізації, можна отримати шляхом лінеаризації динамічних рівнянь:

$$\begin{bmatrix} \dot{\alpha} \\ \dot{q} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ q \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \end{bmatrix} \delta_e,$$

$$y = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ q \\ \theta \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Коефіцієнти лінеаризації матриць A , B можна визначити за параметрами системи і аеродинамічної похідної. Таке представлення опису об'єкта регулювання у вигляді простору станів закладає математичну основу для проєктування контролерів MPC. При цьому прогнозна стратегія управління дозволяє оптимізувати керуючий вплив в певній часовій області та реалізувати точне керування поздовжнім рухом літака. При практичному застосуванні системи fly-by-wire вхід керування піддається фізичним обмеженням, включаючи обмеження амплітуди кута відхилення керма та обмеження швидкості відхилення керма. Для забезпечення безпеки літака змінні стану (такі як кут атаки, кут тангажу і швидкість) також повинні бути обмежені. Керуючі входи і обмеження стану можуть бути представлені у вигляді:

$$\begin{aligned} \delta_{e,\min} &\leq \delta_e \leq \delta_{e,\max}, \\ \dot{\delta}_{e,\min} &\leq \dot{\delta}_e \leq \dot{\delta}_{e,\max}, \\ x_{\min} &\leq x \leq x_{\max}. \end{aligned} \quad (5)$$

де $\delta_{e,\min}$ і $\delta_{e,\max}$ – мінімальна і максимальна межі кута підйому відповідно і верхня і нижня межі швидкості відхилення керма, і діапазон обмеження змінних стану.

В рамках управління MPC ці обмеження безпосередньо включені в задачу оптимізації, відповідно фізичні обмеження завжди задовольняються в процесі вирішення задачі оптимізації, щоб забезпечити безпеку і можливість практичної реалізації системи управління. Оскільки MPC може одночасно враховувати зміну станів системи та обмеження на значення вхідних сигналів керування, така стратегія керування може не тільки відповідати вимогам до динамічної продуктивності, але й мінімізувати споживання енергії та знос приводу, а також збільшити термін служби системи.

Висновки. У роботі запропоновано метод проєктування прогнозного управління на основі моделі, ефективність якого перевіряється теоретичним аналізом і імітаційними експериментами. Шляхом встановлення моделі поздовжньої динаміки літального апарату та використання опису простору станів забезпечується математична основа для реалізації моделі прогнозного керування. Побудована цільова функція оптимізації, а оптимальний вхід керування вирішується шляхом комбінування обмежень таким чином, щоб підвищити точність керування при забезпеченні стабільності системи.

Результати моделювання показують, що в порівнянні з традиційним ПД-регулятором, модель прогнозного управління демонструє кращі показники з точки зору динамічного відгуку, стаціонарної похибки, споживання енергії управління та задоволення обмежень, що може ефективно підвищити точність і стабільність контролю положення повітряного судна.

Список використаних джерел

1. Чен Юцзін, Лі Хонг, Лі Баолян. Метод сертифікації льотної придатності системи управління польотом для цивільного вертольота[J].Динаміка польоту, 2023, 41(2):79–86. [In chinese].
2. Лі Юньсі, Ван Сін. Застосування технології керування резервною конфігурацією для системи керування fly-by-wire[J]. Automation Application, 2023, 64(6):88–89. [In chinese].
3. Чжоу Вей. TT&C Technology, 2020, 39(6):7. [In chinese].
4. Тен Ліцян. Журнал Інженерного університету Військово-Повітряних Сил, 2022, 23 (04):20–28. [In chinese].
5. Фалькон В. Спільна робота покращує успішну систему управління польотом СН-53К[J]. Новини морської авіації, 2022, 104(3):24–27. [In chinese].

References

1. Cheng Yujin, Li Hong, Li Baoliang. Flight Control System Airworthiness Certification Method for Civil Helicopter[J].Flight Dynamics, 2023, 41(2):79–86. [In chinese].
2. Li Yunxi, Wang Xin. Application of redundant configuration management technology for fly-by-wire control system[J]. Automation Application, 2023, 64(6):88–89. [In chinese].
3. Чжоу Вей. TT&C Technology, 2020, 39(6):7. [In chinese].
4. Teng Liqiang. Journal of the Air Force Engineering University, 2022, 23(04):20–28. [In chinese].
5. Falcon V. Joint work improves successful CH-53K[J] flight control system. Marine Aviation News, 2022, 104(3):24–27. [In chinese].

Духно Р. П., аспірант, ORCID 0009-0008-9506-2234,
науковий керівник: канд. техн. наук, професор В. В. Чумак,
Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

ВИПРОБУВАЛЬНА СИСТЕМА ДЛЯ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ІЗОЛЯЦІЇ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН В ПРОЦЕСІ ВИРОБНИЦТВА ТА РЕМОНТУ

TEST SYSTEM FOR QUALITY CONTROL OF INSULATION OF ELECTRICAL MACHINES IN THE MANUFACTURING AND REPAIR PROCESS

Анотація. Дослідження належить до проблеми надійності електричних машин яка пов'язана з найбільш вразливим елементом, а саме ізоляцією обмоток. Сучасні методи перевірки якості міжвиткової ізоляції обмоток не забезпечують об'єктивного висновку про її придатність до подальшого використання. Запропоновано новітній метод діагностики ізоляції в процесі виробництва та ремонту на ключових технологічних операціях до і після укладки обмотки в пази. Бібл. 7, рис. 2.

Ключові слова: діагностика ізоляції, комутаційні перенапруги, нерозвинені дефекти ізоляції обмоток.

Abstract: The study addresses the issue of electrical machine reliability, which is associated with the most vulnerable component—the insulation of the windings. Modern methods for evaluating the quality of inter-turn insulation do not provide an objective conclusion regarding its suitability for further use. A novel method for diagnosing insulation is proposed to be implemented during manufacturing and repair at key technological stages before and after the winding is placed in the slots. Ref. 7, Fig. 2.

Keywords: Insulation diagnostics, switching overvoltages, incipient winding insulation defects.

Вступ. Проблемою надійності електричних машин є найбільш вразливий елемент [1, 2], а саме ізоляція обмоток. Сучасні методи перевірки якості міжвиткової ізоляції обмоток не забезпечують об'єктивного висновку про її придатність до подальшого використання.

Метою дослідження є встановлення фізичних закономірностей комутаційного процесу в магнітно-пов'язаних контурах, що дає змогу розробити випробувальну систему для неруйнівного контролю якості міжвиткової ізоляції обмоток електричних машин в процесі виробництва та ремонту, яка б була здатна знаходити нерозвинені дефекти. Для досягнення поставленої мети в статті проаналізовано існуючі рішення і на основі їх аналізу запропоновано нову випробувальну систему.

Матеріал і результати дослідження. Для визначення нерозвинених дефектів, що становлять подальшу небезпеку і можуть призвести до аварії в процесі експлуатації зі зміною умов роботи машини (атмосферні зміни, температурні перепади, тощо), потрібні високі градієнти потенціалів між витками обмотки [3, 4].

Задачею діагностики є неруйнівні методи контролю ізоляції обмоток. Ця задача досягається наступним чином. В обмотці збудження індуктора протікає постійний струм або змінний струм промислової частоти і в магнітній системі індуктора та випробувальної ділянки магнітопроводу з обмоткою встановлюється максимальне значення магнітного потоку Φ_{max} . Таке положення існує до моменту часу $t = 0$, при якому і починається власне процес випробування.

В цей момент спрацьовує комутуючий елемент – ключ, що розмикає коло струму. Час розриву і закон зміни струму в процесі комутації залежить від типу і можливостей комутуючої системи [5].

Зникнення струму збудження призводить до загасання магнітного потоку. Цей процес розтягується в часі за рахунок виникнення демпфуючої дії вихрових струмів в елементах магнітної системи та ємнісного міжвиткового розсіювання [6].

Зміна магнітного потоку викликає появу наведеної ЕРС у витках усіх обмоток, які з ним зчеплені. Це викликає у випробувальній обмотці появу ЕРС від пошкоджених ділянок. Ця вторинна ЕРС викликає вторинні струми які пов'язані з обмоткою датчика-приймача у якій виникає власна ЕРС. Величина наведеної ЕРС залежить від швидкості загасання потоку, величина потоку Φ_{max} визначається ампер-витками обмотки збудження і сумарним магнітним опором індукторної системи і ділянки випробувального магнітопроводу з обмоткою.

За наявності короткозамкнених контурів (витків) в випробувальній обмотці швидкість зміни потоку зменшується і величина наведеної ЕРС також падає. Ступінь виявлення розвиненості дефектів ізоляції обмоток залежить від добротності індукторної системи і швидкодії ключа. Зміна амплітуди та часу загасання ЕРС є відгуком випробувальної системи на наявність короткозамкнених контурів.

Для діагностики достатньо заживити обмотку збудження постійним струмом (або струмом низької частоти) і раптово розімкнути коло. Спосіб заснований на використанні комутаційного процесу в індукційній системі. Інформацією про наявність короткозамкнених контурів в досліджуваній котушці є аналіз величини та форми ЕРС, що знімається з вимірювальної обмотки.

Діагностика відбувається наступним чином:

1. При випробуванні окремих катушок рис. 1. катушка яку перевіряємо 1 поміщається на сердечник індуктора 2, який потім замикається ярмом 3. При випробуваннях обмоток, вкладених в пази рис. 2. П-подібний сердечник індуктора 2 розміщують на поверхні магнітопроводу електричної машини так, щоб він охоплював випробувальну катушку 1. Ярмом в цьому випадку служить осердя електричної машини 4. Для зменшення немагнітного зазору полюсів індуктора, при випробуванні роторних машин з циліндричною розточкою, повинні мати відповідний профіль. Для усунення можливості виникнення короткозамкнених контурів поверхнями різних частин магнітопроводу поверхні полюсів покривають тонким шаром ізоляції.

2. Обмотка збудження індуктора підключається до джерела живлення 5 і через неї пропускають постійний струм або струм промислової частоти.

3. Струм в обмотці виключається швидкодіючим ключем 6.

4. Вимірюється амплітуда контрольної ЕРС, наведеної або в випробувальній обмотці, або в обмотці збудження, або в додатковій вимірювальній обмотці 7 допоміжного контуру.

5. Заміряна амплітуда ЕРС порівнюється з еталонним значенням. Еталонне значення ЕРС для кожної з трьох обмоток буде своє, пропорційне кількості витків.

6. Якщо амплітуда контрольної ЕРС перевищує еталонне значення робиться висновок, що випробувана обмотка справна.

7. Якщо амплітуда контрольної ЕРС не перевищує еталонне значення робиться висновок, що випробувальна обмотка несправна.

Підвищення достовірності і точності контролю досягається за рахунок підвищення випробувальної міжвиткової напруги. Рівень міжвиткової напруги для виявлення нерозвинених дефектів повинен складати не менше 120 В на виток згідно закону Пашена [7].

До переваг запропонованої системи належать:

- неруйнівність методу;
- швидкість та точність контролю;
- можливість використання на ключових етапах виробництва та ремонту.

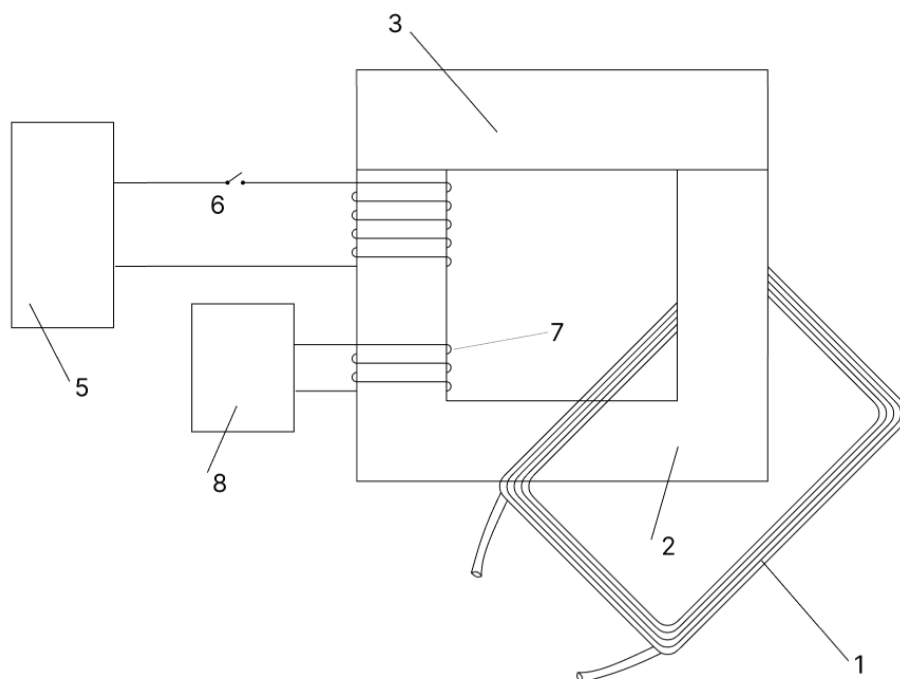


Рисунок 1. Схематичне зображення випробувальної системи при тестуванні окремих котушок

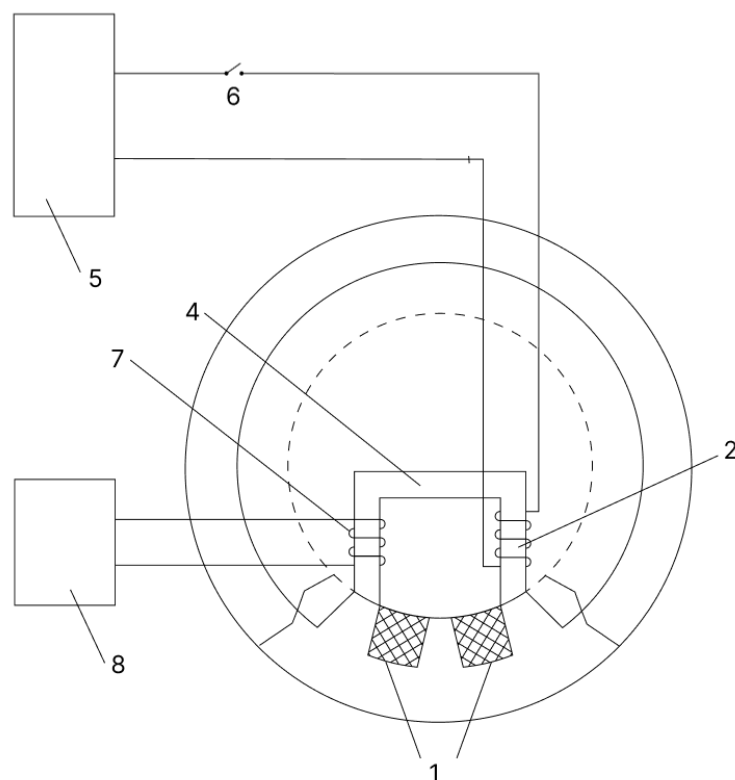


Рисунок 2. Схематичне зображення випробувальної системи при тестуванні вкладених в пази котушок

Висновки. В статті обґрунтовано та запропоновано нову випробувальну систему для неруйнівного контролю якості міжвиткової ізоляції обмоток електричних машин в процесі виробництва та ремонту.

1. Обґрунтовано та запропоновано нову випробувальну систему для неруйнівного контролю якості міжвиткової ізоляції обмоток електричних машин в процесі виробництва та ремонту.

2. Обґрунтовані необхідні рівні перенапруг для виявлення нерозвинених дефектів міжвиткової ізоляції обмоток.

3. Запропоновано конфігурації контрольно-вимірювальної діагностичної системи.

Список використаних джерел

1. Sciascera C., Galea M., Giangrande P., Gerada C. (2016) Lifetime consumption and degradation analysis of the winding insulation of electrical machines. 8th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2016), 1–5. DOI: 10.1049/cp.2016.0231. URL: <https://doi.org/10.1049/cp.2016.0231> (дата звернення 12.01.2025).

2. Kumar L., Nadarajan S., Vaiyapuri V., Gupta A. K., Soong B. H. and Nguyen H. D. (2020) Life Estimation of Electrical Machine using Aging Model. IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 1034–1039. DOI: 10.1109/IECON43393.2020.9254606 URL: <https://doi.org/10.1109/IECON43393.2020.9254606> (дата звернення 27.01.2025).

3. Boglietti A., Cavagnino A., Lazzari M. (2007) Experimental High-Frequency Parameter Identification of AC Electrical Motors. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY

APPLICATIONS, 43 (1), 23–29. ISSN 0093-9994. DOI: 10.1109/TIA.2006.887313. URL: <https://doi.org/10.1109/TIA.2006.887313> (дата звернення 03.01.2025).

4. Joksimović G (2012) A. C. Winding Analysis Using a Winding Function Approach. *International Journal of Electrical Engineering & Education*. 2012;48(1):34–52. DOI: 10.7227/IJEEE.48.1.4. URL: <https://doi.org/10.7227/IJEEE.48.1.4> (дата звернення 04.03.2025).

5. B. Wang J. Hu G. Wang and W. Hua (2020) “A Novel Stator Turn Fault Detection Technique by Using Equivalent High Frequency Impedance”, in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 130540–130550, 2020, DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3009109. URL: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3009109> (дата звернення 27.02.2025).

6. Чумак В., Баженов В., Духно Р., Ігнатюк Є., Вишневецький О (2024) Аналітичні та статистичні оцінки методики оцінювання якості шихтованих магнітопроводів. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2024. № 3 ISSN 1813–5420, DOI: 10.20535/1813-5420.3.2024.314531. URL: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.3.2024.314531> (дата звернення 28.11.2024).

7. Husain E.; Nema R. (August 1982) “Analysis of Paschen Curves for air, N₂ and SF₆ Using the Townsend Breakdown Equation”. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*. EI-17 (4): 350–353. DOI: 10.1109/TEI.1982.298506. URL: <https://doi.org/10.1109/TEI.1982.298506> (дата звернення 28.11.2024).

References

1. Sciascera C., Galea M., Giangrande P., Gerada C. (2016) Lifetime consumption and degradation analysis of the winding insulation of electrical machines. 8th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2016), 1–5. DOI: 10.1049/cp.2016.0231. URL: <https://doi.org/10.1049/cp.2016.0231> (accessed 12.01.2025).

2. Kumar L., Nadarajan S., Vaiyapuri V., Gupta A. K., Soong B. H. and Nguyen H. D. (2020) Life Estimation of Electrical Machine using Aging Model. *IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 1034–1039. DOI: 10.1109/IECON43393.2020.9254606 URL: <https://doi.org/10.1109/IECON43393.2020.9254606> (accessed 27.01.2025).

3. Boglietti A., Cavagnino A., Lazzari M. (2007) Experimental High-Frequency Parameter Identification of AC Electrical Motors. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*, 43(1), 23–29. ISSN 0093-9994. DOI: 10.1109/TIA.2006.887313. URL: <https://doi.org/10.1109/TIA.2006.887313> (accessed 03.01.2025).

4. Joksimović G (2012) A. C. Winding Analysis Using a Winding Function Approach. *International Journal of Electrical Engineering & Education*. 2012;48(1):34–52. DOI: 10.7227/IJEEE.48.1.4. URL: <https://doi.org/10.7227/IJEEE.48.1.4> (accessed 04.03.2025).

5. B. Wang J. Hu G. Wang and W. Hua (2020) “A Novel Stator Turn Fault Detection Technique by Using Equivalent High Frequency Impedance”, in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 130540–130550, 2020, DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3009109. URL: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3009109> (accessed 27.02.2025).

6. Chumak V., Bazenov V., Dukhno R., Ighnatiuk Y., Vishnevsky O. (2024) Analytical and statistical assessments of the methodology for evaluating the quality of laminated magnetic cores. *Energy: economics, technology, ecology*. 2024. No. 3 ISSN 1813–5420, DOI: 10.20535/1813-5420.3.2024.314531. URL: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.3.2024.314531> (accessed 28.11.2024). (Ukr).

7. Husain E.; Nema R. (August 1982) “Analysis of Paschen Curves for air, N₂ and SF₆ Using the Townsend Breakdown Equation”. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*. EI-17 (4): 350–353. DOI: 10.1109/TEI.1982.298506. URL: <https://doi.org/10.1109/TEI.1982.298506> (accessed 28.11.2024).

Райченко А. Є., аспірант, ORCID 0009-0000-2116-6227,
науковий керівник: канд. техн. наук, доцент **О. С. Ярмолюк**,
Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЗЕРВНОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ КОМУНАЛЬНО-ПОБУТОВИХ ОБ’ЄКТІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ УСТАНОВОК ЗБЕРІГАННЯ ЕНЕРГІЇ

OPTIMIZATION OF BACKUP POWER SUPPLY FOR UTILITY AND HOUSEHOLD FACILITIES USING ENERGY STORAGE SYSTEMS

Анотація. У статті розглянуто проблему оптимізації резервного електропостачання комунально-побутових об’єктів шляхом застосування установок зберігання енергії. Проаналізовано основні недоліки традиційних джерел резервного живлення, зокрема дизельних та газових генераторів, та обґрунтовано доцільність впровадження літій-феррофосфатних акумуляторних систем. Наведено результати досліджень, які підтверджують підвищення надійності та ефективності електропостачання за рахунок застосування установок зберігання енергії. Бібл. 7, рис. 1.

Ключові слова: резервне електропостачання, установки зберігання енергії, акумуляторні батареї, LiFePO_4 , надійність енергозабезпечення, час відновлення живлення, комунально-побутові об’єкти, оптимізація електропостачання.

Abstract. The article addresses the issue of optimizing backup power supply for residential and public utility facilities through the implementation of energy storage systems. The disadvantages of traditional backup power sources, such as diesel and gas generators, are analyzed, and the feasibility of integrating lithium iron phosphate (LiFePO_4) battery systems is substantiated. The research results confirm the improvement in power reliability and efficiency due to the adoption of energy storage systems. Ref. 7, Fig. 1.

Keywords: backup power supply, energy storage systems, battery technologies, LiFePO_4 , power supply reliability, power restoration time, residential and public facilities, power supply optimization.

Вступ. Надійність електропостачання комунально-побутових об’єктів є критично важливим параметром, що визначає рівень комфорту населення та безперебійне функціонування житлової і соціальної інфраструктури. В умовах зростаючої нестабільності енергосистем, обумовленої аварійними відключеннями, необхідність забезпечення ефективного резервного живлення набуває особливої актуальності [1]. Одним із перспективних напрямів вирішення зазначеної проблеми є впровадження установок зберігання енергії (УЗЕ), зокрема акумуляторних батарей на основі літій-феррофосфатних (LiFePO_4) сполук, а також суперконденсаторних систем [2].

Метою досліджень є аналіз ефективності використання УЗЕ у якості резервного джерела живлення для комунально-побутових об’єктів, а також розробка рекомендацій щодо їх оптимальної інтеграції у міську енергетичну інфраструктуру.

Матеріал і результати досліджень. Традиційні методи резервного електропостачання, зокрема застосування дизельних та газових генераторів, характеризуються низкою суттєвих недоліків, серед яких низька екологічність, високі експлуатаційні витрати та обмежений ресурс експлуатації [3]. Водночас сучасні УЗЕ мають значні переваги, серед яких:

- підвищений коефіцієнт корисної дії (ККД понад 90 %) порівняно з генераторними установками;
- можливість інтеграції у системи безперебійного живлення (UPS);
- зменшення обсягів викидів CO_2 , що відповідає сучасним екологічним стандартам [4];
- мінімальний час реакції на перебої в енергопостачанні.

Процес оптимізації резервного електропостачання передбачає вирішення таких завдань:

- оцінка рівня навантаження комунально-побутового об'єкта з урахуванням критичності окремих груп споживачів;
- розрахунок необхідної ємності акумуляторних батарей на підставі середньої тривалості відключень електроенергії;
- вибір оптимальної конфігурації УЗЕ (централізована або децентралізована схема);
- моделювання роботи УЗЕ у різних режимах експлуатації з метою мінімізації втрат енергії та підвищення їх ефективності.

Залежно від масштабів об'єкта доцільним є застосування різних технологічних рішень для УЗЕ. Так, для багатоповерхових житлових комплексів доцільним є використання літій-ферофосфатних (LiFePO_4) акумуляторних батарей, що характеризуються високим ККД та тривалим терміном експлуатації (понад 6000 циклів) [5]. Водночас для невеликих об'єктів перспективним є впровадження гібридних систем, що поєднують акумуляторні технології із сонячними фотоелектричними модулями. При цьому, наприклад, у разі забезпечення електроживлення ліфтових установок, як показано на рис. 1 необхідно передбачити значний резерв потужності як для інверторної системи, так і для акумуляторних батарей, з метою гарантування стабільної роботи та запобігання перевантаженням [7].

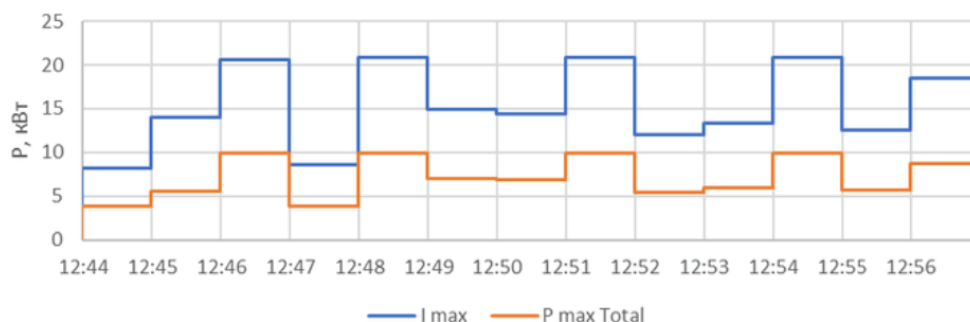


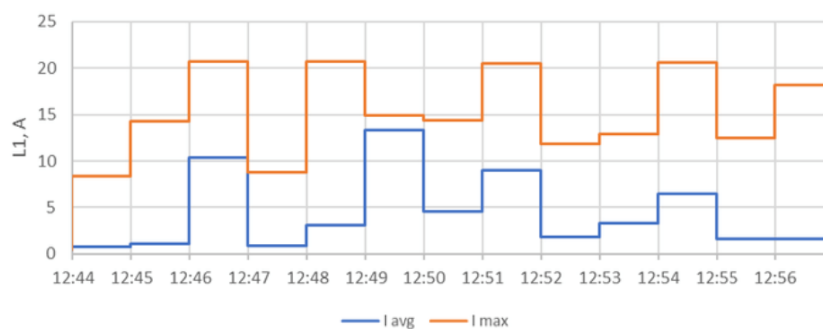
Рисунок 1. Результати замірів пускових струмів під час роботи ліфту 400 кг з перетворювачами частоти [7]

Перетворювачі частоти забезпечують регулювання напруги та струму у фазах, виконуючи функцію керування електродвигуном ліфта шляхом зміни частоти напруги. Такий підхід дає змогу здійснювати плавний розгін та гальмування механізму, підвищуючи ефективність роботи підйомного обладнання. Водночас використання перетворювачів частоти може призводити до певної асиметрії фазних струмів, що найбільш виражено у перехідних режимах, зокрема під час пуску та зупинки, рис. 2а), 2б), 2в).

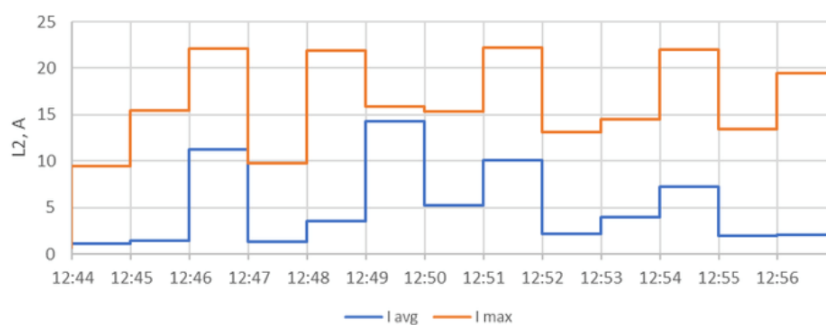
Зміна навантаження в процесі експлуатації ліфта також зумовлює нерівномірний розподіл струмів у фазах. Пускові струми, які виникають у момент запуску електродвигуна, можуть значно відрізнятись залежно від динамічного характеру навантаження.

Ще одним чинником, який впливає на відмінності між фазами, є нерівномірність параметрів обмоток електродвигуна або особливості електромережі, до якої він підключений. У реальних умовах електричні машини можуть мати незначні відхилення у характеристиках своїх обмоток, що спричиняє варіації у фазних струмах. Крім того, наявність асиметрії у напрузі живлення через особливості внутрішньої електромережі будівлі також є вагомим фактором, що впливає на рівномірність струмових навантажень.

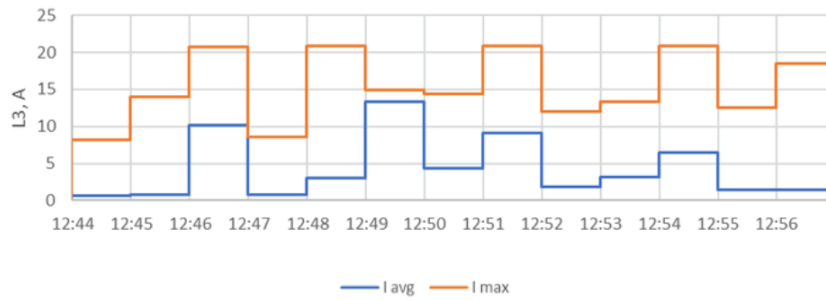
Окремо слід зазначити вплив нелінійних навантажень, зокрема імпульсних блоків живлення та елементів керування електродвигуном. Використання перетворювачів частоти на основі широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) спричиняє появу вищих гармонік у спектрі струмів, що може викликати нерівномірність розподілу фазних струмів та потенційно впливати на стабільність роботи електромережі.



а) струм у фазі L1



б) струм у фазі L2



в) струм у фазі L3

Рисунок 2. Зміна фазних струмів під час роботи ліфта

Одним із критеріїв оптимізації є мінімізація питомих експлуатаційних витрат при виборі УЗЕ, що дозволяє підвищити економічну ефективність роботи енергосистеми. Цільові функції, характеризують оптимальне функціонування УЗЕ, основною метою є визначення критеріїв ефективності роботи з урахуванням економічних, технологічних та екологічних параметрів.

Важливим аспектом також є пріоритетне використання УЗЕ з мінімальним значенням числа годин використання максимуму навантаження $T_{\max}$, що сприяє раціональному залученню обладнання з обмеженими енергетичними ресурсами та забезпечує рівномірний розподіл навантаження між установками.

Крім того, значну увагу приділено екологічним аспектам функціонування УЗЕ. Оптимізація режимів роботи передбачає пріоритетне використання потужностей із мінімальним рівнем шкідливих викидів в атмосферу. Впровадження таких підходів дозволяє мінімізувати вплив на довкілля, стимулюючи розвиток відновлюваних джерел енергії.

Формування цільових функцій дає змогу забезпечити узгоджене управління УЗЕ з урахуванням потреб споживачів та сприяє підвищенню надійності та ефективності її функціонування. Структура кожної цільової функції визначається виходячи з особливостей технологічного процесу та вимог до критеріїв оптимізації:

$$F_{jt}(\mathbf{P}) = \sum_{i=1}^n a_{ji} P_{it}, \quad (1)$$

де $j = 1, \dots, m$ – загальна кількість цільових функцій;

n – кількість джерел (факторів);

t – конкретний період часу;

a_{ji} – технічні/економічні/екологічні/інші характеристики (критерії) на 1 кВт·год зарезервованої електричної енергії, які характерні для певної i -тої технологічної УЗЕ.

В окремих цільових функціях коефіцієнт a_{ji} буде відповідно приймати питомих значення експлуатаційних витрат, значення числа годин використання максимуму $T_{\max i}$, рівень шкідливих викидів в атмосферу тощо. У процесі розв'язання задачі окремі з наведених цільових функцій будуть потребувати мінімізації, а інші – максимізації. У цьому випадку задача у математичному плані може бути сформована визначенням окремих періодів t

$$F_{jt}(\mathbf{P}) \rightarrow \text{extr}, j = 1, \dots, m, \mathbf{P} = \{P_1, \dots, P_i, \dots, P_n\}, \quad (2)$$

де m – кількість цільових функцій.

Зазначені цільові функції можуть бути представлені у математичній формі, що дозволяє здійснювати їх формалізований аналіз та застосування в алгоритмах оптимізації енергосистем. Одним із основних критеріїв є першочергове залучення джерел з мінімальним питомим значенням експлуатаційних витрат. Такий підхід дає змогу оптимізувати використання ресурсів з урахуванням обмежень потужності та режимів навантаження:

$$F_1(\mathbf{P}) = a_{11}P_1 + a_{12}P_2 + \dots + a_{1i}P_i + \dots + a_{1n}P_n \rightarrow \min,$$

де $a_{11}, a_{12}, \dots, a_{1i}, \dots, a_{1n}$ відповідають питомому значенню експлуатаційних витрат на 1 кВт·год зарезервованої електричної енергії характерному для певної технологічної УЗЕ.

Пріоритетне використання УЗЕ із максимальним значенням числа годин використання максимуму сприяє оптимізації експлуатаційних характеристик енергосистеми. Такий підхід забезпечує раціональний розподіл навантаження між джерелами генерації, дозволяючи знизити навантаження на обладнання, що працює в пікових режимах.

$$F_2(\mathbf{P}) = a_{21}P_1 + a_{22}P_2 + \dots + a_{2i}P_i + \dots + a_{2n}P_n \rightarrow \max, \quad (3)$$

де $a_{21}, a_{22}, \dots, a_{2i}, \dots, a_{2n}$ відповідають значенню $T_{\max}$, характерному для певної технологічної УЗЕ.

Використання джерел із мінімальним рівнем шкідливих викидів в атмосферу, що сприяє зниженню негативного впливу на довкілля, та відповідає сучасним екологічним стандартам та вимогам міжнародних протоколів:

$$F_3(\mathbf{P}) = a_{31}P_1 + a_{32}P_2 + \dots + a_{3i}P_i + \dots + a_{3n}P_n \rightarrow \min, \quad (4)$$

де $a_{31}, a_{32}, \dots, a_{3i}, \dots, a_{3n}$ відповідають значенню шкідливих викидів в атмосферу характерному для певної технологічної УЗЕ.

Наступним етапом є визначення обмежень, які впливають на розв'язання задачі. Основними обмежувальними факторами є технічні характеристики окремих УЗЕ, що входять до складу енергосистеми. Це

передбачає врахування номінальної потужності, допустимого діапазону навантажень, режимів роботи та експлуатаційних параметрів кожної УЗЕ:

$$P_{it}^{min} \leq P_{it} \leq P_{it}^{max}, \quad (5)$$

де P_{it} – відповідна доля електричного навантаження, яка надається i -ю УЗЕ, у кожний період часу t ;

P_{it}^{min} , P_{it}^{max} – відповідні обмеження за потужністю для кожної УЗЕ, яке розглядається у кожний період часу t .

Висновки. Оптимізація резервного електропостачання комунально-побутових об'єктів шляхом впровадження установок зберігання енергії є одним із ключових факторів підвищення надійності електричних мереж. Застосування сучасних акумуляторних технологій забезпечує високу енергоефективність, мінімальні затримки при перемиканні на резервне живлення, а також відповідає екологічним вимогам. Подальший розвиток даної сфери сприятиме розробці економічно обґрунтованих та технологічно досконалих рішень для міської енергетичної інфраструктури [6].

Список використаних джерел

1. Законодавче регулювання установок зберігання енергії в Україні // Українська енергетика. – 2022. URL: <https://ua-energy.org/uk/posts/opublikovanyi-zakon-pro-systemy-zberihannia-enerhii>. (дата звернення 24.03.2025).
2. ДТЕК інвестує 140 млн євро у системи зберігання енергії для посилення енергетичної безпеки України // Renewables DTEK. – 2024. URL: <https://renewables.dtek.com/media-center/press/dtek-to-invest-140-million-in-energy-storage-systems-to-strengthen-ukraines-energy-secu> (дата звернення 24.03.2025).
3. Експерти розповіли про особливості використання установок зберігання енергії в Україні // Ecopolitic. – 2024. URL: <https://ecopolitic.com.ua/ua/news/eksperti-rozpozvili-pro-osoblivosti-vikoristannya-ustanovok-zberigannya-energii-v-ukraini>. (дата звернення 24.03.2025).
4. Бабюк С. М. Фактори, що впливають на надійність електропостачання / С. М. Бабюк // Актуальні задачі сучасних технологій. – Тернопіль: ТНТУ, 2020. URL: https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/34722/2/AZST_2020v2_Babiuk_S_M-Factors_affecting_the_reliability_84-85.pdf. (дата звернення 24.03.2025).
5. Стан та перспективи розвитку установок зберігання енергії в енергосистемі України // EXPRO. – 2023. URL: <https://expro.com.ua/novini/ustanovki-zbergannya-energ-v-energosistem-ukrani-stan-ta-perspektivi-rozvitku>. (дата звернення 24.03.2025).
6. Перша в Україні установка зберігання енергії від SPP Development // SPP Development Ukraine. – 2023. URL: <https://sppdevelopment.com.ua/uk/energy-storage-system-ua>. (дата звернення 24.03.2025).
7. Литвин В., Ніколаєнко М., Купчак С., Прокопенко Д. Каталог типових технічних рішень для резервного живлення будівель з використанням відновлюваних джерел енергії. Київ, 2024. 75 с.

References

1. Legislative Regulation of Energy Storage Installations in Ukraine // Ukrainian Energy. – 2022. URL: <https://ua-energy.org/uk/posts/opublikovanyi-zakon-pro-systemy-zberihannia-enerhii>. (accessed 24.03.2025). (Ukr).

2. DTEK Invests 140 Million Euros in Energy Storage Systems to Strengthen Ukraine's Energy Security // Renewables DTEK. – 2024. URL: <https://renewables.dtek.com/media-center/press/dtek-to-invest-140-million-in-energy-storage-systems-to-strengthen-ukraines-energy-secu>. (дата звернення 24.03.2025). (Ukr).
3. Experts Discuss the Features of Using Energy Storage Installations in Ukraine // Ecopolitic. – 2024. URL: <https://ecopolitic.com.ua/ua/news/eksperti-rozpovili-pro-osoblivosti-vikoristannya-ustanovok-zberigannya-enerгии-v-ukrainiu> (accessed 24.03.2025). (Ukr).
4. Babyuk S. M. Factors Affecting the Reliability of Power Supply / S. M. Babyuk // Current Issues of Modern Technologies. – Ternopil: TNTU, 2020. URL: https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/34722/2/AZST_2020v2_Babiuk_S_M-Factors_affecting_the_reliability_84-85.pdf (accessed 24.03.2025). (Ukr).
5. Status and Prospects for the Development of Energy Storage Installations in Ukraine's Energy System // EXPRO. – 2023. URL: <https://expro.com.ua/novini/ustanovki-zbergannya-energ-v-energosisistem-ukrani-stan-ta-perspektivi-rozvitku> (accessed 24.03.2025). (Ukr).
6. Ukraine's First Energy Storage Installation by SPP Development // SPP Development Ukraine. – 2023. URL: <https://sppdevelopment.com.ua/uk/energy-storage-system-ua> (accessed 24.03.2025). (Ukr).
7. Lytvyn V., Nikolaienko M., Kupchak S., Prokopenko D. Catalogue of Standard Technical Solutions for Backup Power Supply of Buildings Using Renewable Energy Sources. Kyiv, 2024. 75 p.

УДК 620.9+519.852

Прасол А. А., аспірант, ORCID 0009-0009-2743-3301,
науковий керівник: канд. техн. наук, доцентка **О. В. Бориченко**,
Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

**ОПТИМІЗАЦІЯ РОБОТИ BESS З УРАХУВАННЯМ ЦИКЛІВ
ВАРТОСТІ ЗАРЯДУ
І РОЗРЯДУ ЗА ДОПОМОГОЮ ЛІНІЙНОГО ПРОГРАМУВАННЯ**

**OPTIMIZATION OF BESS OPERATION TAKING INTO ACCOUNT
CHARGING AND DISCHARGE COST CYCLES USING LINEAR
PROGRAMMING**

***Анотація.** У статті представлено модель лінійного програмування для оптимізації роботи систем зберігання енергії (BESS), що враховує економічні витрати та вплив циклічних операцій зарядки/розрядки на термін служби акумуляторів. Модель об'єднує дані про попит, генерацію електроенергії з відновлюваних джерел та динаміку цін, отримані за 30 днів із 5-хвилинним інтервалом, для формування типової добової кривої. Завдяки агрегуванню статистичних даних та побудові системи лінійних обмежень забезпечується оптимальне керування зарядом і розрядом, що мінімізує загальні витрати системи та підвищує стабільність роботи енергосистеми.. Бібл. 2, рис. 1.*

***Ключові слова:** BESS, оптимізація, лінійне програмування, життєвий цикл акумулятора, ВДЕ.*

Abstract. *The article presents a linear programming model for optimizing the operation of energy storage systems (BESS), which takes into account economic costs and the impact of cyclic charging/discharging operations on the service life of batteries. The model combines data on demand, renewable electricity generation and price dynamics, obtained over 30 days with a 5-minute interval, to form a typical daily curve. By aggregating statistical data and building a system of linear constraints, optimal charge and discharge control is ensured, which minimizes the total system costs and increases the stability of the power system. Ref. 2, Fig. 1.*

Keywords: *BESS, optimization, linear programming, battery life cycle, renewable energy.*

Вступ. Акумуляторні системи накопичення енергії (BESS), є технологією зберігання електроенергії, яка базується на використанні груп акумуляторних батарей для накопичення та подальшого розподілу енергії в електричних мережах.

В статті використовується англomовна термінологія – BESS, SOC, EMS, яка в законодавстві України має як і відповідники так і оригінальні аббревіатури.

Оскільки BESS не мають механічних частин, вони забезпечують надзвичайно швидкий час реакції та запуску – лише 10 мс (не враховуючи обмеження часу реакції інвертора). Це дає змогу ефективно компенсувати швидкі коливання, що виникають у випадках, коли електрична мережа перевантажена або зазнає аномальних станів. Такі нестабільності, що тривають до 30 секунд, можуть спричинити коливання напруги, частоти та фази, здатні призвести до регіональних відключень електроенергії, що в Україні є одним з найвищих показників. Оптимально розрахована BESS здатна ефективно нейтралізувати ці коливання, що особливо важливо для регіонів, де в енергосистемі перетоки потужності є максимальними, підвищуючи ризик нестабільності.

З метою підвищення ефективності роботи BESS, вони обладнуються EMS – системою управління енергією (*Energy Management System*). Економічні показники системи накопичення, за оптимізацію яких відповідає EMS починають ставати застосовними до роботи контрагентів ринку, які займаються арбітражем електроенергії.

Останнім часом зростає роль EMS у посиленні ефективності передачі електроенергії: зокрема, довгі лінії електропередачі можуть працювати ближче до своєї максимальної потужності, якщо акумуляторні системи компенсують локальні дисбаланси між попитом і пропозицією енергії. В умовах підвищеного попиту на електроенергію, і зокрема на високий і незадоволений попит в години максимуму в Україні, критично необхідно впроваджувати BESS в локальні мережі, з каліброваною економічною моделлю.

Метою досліджень є оптимізація роботи системи зберігання електроенергії для мінімізації витрат системи з використанням моделі лінійного програмування. В межах дослідження були поставлені завдання дослідити можливості формування балансів електроенергії в *мікромережі* зі встановленою BESS.

Матеріал і результати досліджень

Аналіз змін енергії в BESS

Коли батарея (BESS) бере участь у ринку енергії та регулювання, її заряд змінюється протягом дня. Ці зміни можна представити у вигляді графіка, де є *локальні максимуми та мінімуми* – точки, в яких рівень заряду досягає піку або спадає до найнижчого значення.

$$E_B^{k+1} = E_B^k - P_B^k \cdot \Delta\delta - d \cdot |P_B^k \Delta\delta|, \quad (1)$$

де E_B – стан заряду батареї на кроці k при $k \in [0-288]$;

$\Delta\delta$ – це коефіцієнт, який використовується для перетворення потужності в енергію на основі фактичного часу кожного кроку керування. Ми використовуємо 1/12 – так як інтервали потужності даних складають 5 хв;

P_B – потужність заряду/розряду, тобто $P_B > 0$ – процес розряду, $P_B < 0$ – процес заряду;

$d > 0$ – це коефіцієнт втрат при зарядці/розрядці BESS.

В кожен момент часу системою EMS приймаються рішення щодо: зарядки батареї, розрядки батареї, обміну енергією з мережею, стану заряду (SOC) акумуляторної батареї. Ми припускаємо що часовий горизонт моделювання складається з T кроків. В силу отриманих даних за один місяць (лютий) з реальної станції з системою накопичення і СЕС – ми використовуємо 288 значень що дорівнює 288 5-ти хвилинним інтервалам, що складає 24 години. Для оптимізації ми агрегуємо ці дані, обчислюючи середнє значення для кожного інтервалу протягом 30 днів, що дозволяє отримати типовий добовий профіль.

По мірі інтенсивних зарядів і розрядів під час роботи BESS, це прискорює деградацію батарей, що призведе до збільшення експлуатаційних витрат на батареї. Тому не слід нехтувати додатковими витратами, спричиненими нижчим, ніж очікуваний, терміном служби акумуляторів, і для досягнення оптимальної диспетчеризації слід включити деякі функції, що відображають вартість циклічних акумуляторів через дії заряджання/розряджання [1].

Цільова функція Z складається з витрат на купівлю/продаж енергії та штрафів за експлуатаційні цикли. Математично цільова функція може бути записана як:

$$Z = \sum_{t=1}^T [\lambda(x_c(t) + x_d(t)) + C(t) \cdot x_g(t)] \rightarrow \min, \quad (2)$$

де λ – коефіцієнт штрафу (методи штрафних функцій є чисельними підходами для розв'язання завдань оптимізації, що накладає додаткові «витрати» на порушення обмежень) для уникнення надмірних циклів;

$C(t)$ – ціна електроенергії в t момент часу;

$x_c(t)$ – потужність заряду в t момент часу (не перевищує $P_{\max}$);

$x_d(t)$ – потужність розряду в t момент часу (не перевищує $P_{\max}$);

$x_g(t)$ – потужність, що постачається в або забирається з мережі.

З цих змінних складається вектор рішень, куди входить також SOC BESS.

Динаміка SOC BESS

Для $t=1, 2, \dots, T-1$ має виконуватись рівняння:

$$E(t+1) = E(t) = \eta_c \cdot x_c(t) - \frac{x_d(t)}{\eta_d} = 0, \quad (3)$$

де η_c – електрична ефективність зарядки (програмована, або закладена апаратно в інвертор); η_d – ефективність розрядки. При початковому стані заряду $E(1) = E_0$ – як обмеження.

Баланс енергії (зв'язок між попитом, генерацією та роботою BESS) в мережі:

$$x_g(t) - x_c(t) + x_d(t) = D(t) - R(t), \quad (4)$$

де $D(t)$ – попит на кроці t ; $R(t)$ – виробництво з СЕС на кроці t .

Обмеження для моделі

$$0 \leq x_c(t) \leq P_{\max}; \quad 0 \leq x_d(t) \leq P_{\max}; \quad E_{\min} \leq E(t) \leq E_{\max}. \quad (5)$$

Зазвичай перетікання потужності в мережі $x_g(t)$, математично може бути як додатній так і від'ємний, тому ми обмежень не вводимо.

Вихідні дані

У нашій роботі ми використовуємо набір даних, що складається з трьох часових рядів за 30 днів, де дані збираються з інтервалом 5 хвилин (тобто 288 значень на день). Попит на електроенергію, ціна, генерація електроенергії з фотовольтаїчного масиву у вигляді рядів даних електронної таблиці Excel. При цьому параметри моделі складали такі значення: $n=5$ – кількість паралельних BESS; $E_{\max} = 200$ – максимальний SOC, кВт·год; $E_{\min} = 20$ – мінімальний SOC, кВт·год; $E_0 = 100$ – початковий SOC, %; $P_{\max} = 50$ – максимальна потужність, кВт; $\eta_c = 0,95$ – ефективність зарядки; $\eta_d = 0,95$ – ефективність розрядки; $\lambda = 0,01$ – штраф за інтенсивні цикли (мінімізує використання батареї); $\delta = 1/12$ – тривалість кроку (5 хв.).

Дані про ціни на електроенергію ми отримали з апроксимації даних з [2], що допомогло розкрити основу можливостей роботи BESS. Коротші інтервали дозволяють оперативніше реагувати на швидкісні утворення обсягів електроенергії на ринку, що є перевагою для інтеграції послуг, таких як арбітраж та регулювання частоти. У випадку українського ринку електроенергії, інтервал 1 година на РДН – занадто великий, і є перешкодою для створення нормальних умов для роботи BESS. Отже критично важливо для *фасилітації* використання ВДЕ і розподілених ресурсів збільшувати динаміку роботи ринку. Тож ми припускаємо що використання моделі

можливе тільки за такої кон'юнктури ринку. Результати моделювання представлені на рис. 1.

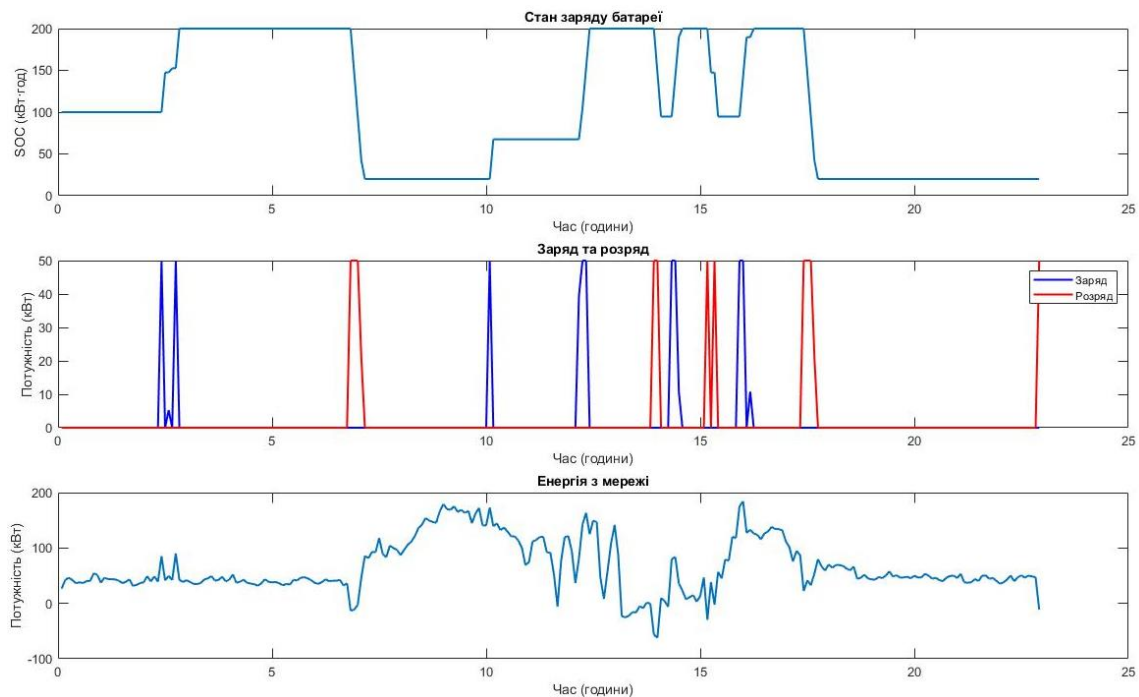


Рисунок 1. Результати моделювання (SOC, кВт·год; потужність заряду і розряду, кВт; споживання і віддача електроенергії в мережу, кВт)

Обробка результатів

SOC впродовж доби різко зростає до максимального рівня або знижується до мінімального. Крива синього кольору це зарядка батареї: система споживає енергію з мережі або з ВДЕ для накопичення. Крива червоного кольору – це розрядка акумуляторів: батарея віддає енергію у внутрішнє навантаження чи мережу, зменшуючи SOC. У деяких моментах SOC залишається на одному рівні, що означає наявність явної вигоди від зарядки чи розрядки за поточних умов (ціни/попиту/генерації). Отже розроблена модель, яка має сформувати управлінські дії, за результатами моделювання, буде керувати EMS – повністю зарядити чи розрядити батарею за короткі проміжки часу, коли це економічно доцільно (частково – при низькій ціні на електроенергію – заряджається, а при високій – розряджається).

Перспективи подальших досліджень

Дослідження можуть спрямовуватися на розробку моделей інтеграції для різних сегментів – від житлових масштабів (*residential*) до комерційних та *utility*-рішень. Це дозволить адаптувати алгоритми управління та оптимізації до специфічних вимог кожного сегмента ринку електроенергії. Використання коротших часових інтервалів у ціноутворенні (як у багатьох західних країнах) може дозволити більш ефективно управляти BESS. Також дослідження можуть удосконалити моделі прогнозування деградації та

розробити алгоритми, що мінімізують вплив частих циклів зарядки/розрядки на термін служби BESS.

Висновки. Результати моделювання свідчать, система EMS що враховує динаміку попиту, генерацію з ВДЕ та цін у моделі лінійного програмування дозволяє ефективно управляти зарядом і розрядом акумуляторних систем. Стрибокоподібні значення SOC та «повні» заряд/розряд (до максимуму або мінімуму) є типовими для моделей, що орієнтуються виключно на мінімізацію витрат і не мають жорстких обмежень на швидкість зарядки чи розрядки. У реальних системах, тобто тими що мають технічні обмеженнями на потокорозподіл потужності, усталене відхилення напруги, розмах зміни напруги, доза флікера і т.д. – крива SOC виглядає з мінімальною кількістю стрибкоподібних відхилень.

Світовий ринок акумуляторів швидко розвивається, оскільки попит різко зростає, а ціни на акумулятори продовжують падати, що не забезпечить мережі від хаотичного приєднання до них систем виробництва електроенергії на низькій напрузі. Тому формування задач щодо інтеграції BESS та їх вирішення щодо процесів зарядки та розрядки є важливим. По-перше, існує потреба модернізувати існуючу мережеву інфраструктуру в Україні, щоб вона могла ефективно працювати з високою долею ВДЕ, які мають значну варіацію виробництва. По-друге, необхідно створити чіткі нормативно-правові рамки та ринкові механізми, які дозволяють торгувати електроенергією за інтервалами коротшими за годину, що сприятиме швидкому реагуванню на коливання попиту та генерації.

Список використаних джерел

1. He G.; Chen Q.; Kang C.; Pinson P.; Xia Q. Optimal bidding strategy of battery storage in power markets considering performance-based regulation and battery cycle life. IEEE Trans. Smart Grid 2015, 7, 2359–2367;
2. Zhuo W.; Savkin A. V. Profit Maximizing Control of a Microgrid with Renewable Generation and BESS Based on a Battery Cycle Life Model and Energy Price Forecasting. Energies 2019, 12, 2904. 1. URL: <https://doi.org/10.3390/en12152904> (дата звернення 04.03.2025).

References:

1. He G.; Chen Q.; Kang C.; Pinson P.; Xia Q. Optimal bidding strategy of battery storage in power markets considering performance-based regulation and battery cycle life. IEEE Trans. Smart Grid 2015, 7, 2359–2367.
2. Zhuo W.; Savkin A. V. Profit Maximizing Control of a Microgrid with Renewable Generation and BESS Based on a Battery Cycle Life Model and Energy Price Forecasting. Energies 2019, 12, 2904. 1. URL: <https://doi.org/10.3390/en12152904> (accessed at 04.03.2025).

Дзьоба М. В., аспірант, ORCID 0000-0002-5159-0317,
науковий керівник: д-р техн. наук, професор О. О. Фролов,
Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПРОТИЗСУВНИХ КОНСТРУКЦІЙ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТІЙКОСТІ ПРИБОРТОВИХ МАСИВІВ

JUSTIFICATION OF THE PARAMETERS OF ANTI-LANDSLIDE STRUCTURES FOR ENSURING THE STABILITY OF PIT WALL ROCK MASSES

Анотація. Метою досліджень є обґрунтування та встановлення параметрів захисної конструкції з буронабивних паль для зміцнення прибортового гірського масиву суглинків і моделювання стану борта кар'єру при дії на нього зовнішнього додаткового навантаження. За результатами моделювання стану кінцевого положення борта кар'єру Жидачівського родовища суглинків при додатковому зовнішньому навантаженні від дії автотранспорту встановлено, що мінімальне значення коефіцієнту стійкості становить $k_c = 0,911$, тобто досліджуваний борт є зсувонебезпечним. Для забезпечення стійкості укосу рекомендовано встановити захисну конструкцію з двох рядів буронабивних паль, що збільшує коефіцієнт стійкості до $k_c = 1,218$. Бібл. 8, рис. 3.

Ключові слова: гірський масив, зсувні явища, стійкість укосу, захисні конструкції, борт кар'єру, буронабивні палі, моделювання, Rocscience Slide, коефіцієнт стійкості укосу.

Abstract. The purpose of the research is to substantiate and establish the parameters of the protective structure of bored piles for strengthening the instrumental rock massif of loams and modeling the state of the slope under the influence of external additional load. According to the results of modeling the state of the final position of the slope of the side of Zhidachevsky loam deposit under additional external load from the action of motor transport, it was found that the minimum value of the stability coefficient is $k_c = 0.911$, that is, the studied rock massif is unstable. It is recommended to install a protective structure of two rows of bored piles, which increases the stability coefficient to $k_c = 1.218$. Ref. 8, Fig. 3.

Keywords: rock massif, landslide, slope stability, protective structures, quarry face, bored piles, modeling, Rocscience Slide, slope stability coefficient.

Вступ. Розробка родовищ будівельних корисних копалин відкритим способом характеризується складністю геологічних і гідрогеологічних умов їх видобування та концентрацією гірничих робіт. Ці чинники впливають на стійкість укосів уступів та бортів кар'єрів, які, у свою чергу, визначають ефективність та повноту відпрацювання кожного конкретного родовища, а також техніко-економічні показники роботи гірничого підприємства. Тому однією з основних задач гірництва є визначення раціональних параметрів укосів гірських масивів з метою забезпечення їх тривалої стійкості при мінімальних обсягах гірничо-прохідницьких робіт [1].

Слід відмітити, що завищені кути укосів неминуче призводять до розвитку зсувних явищ в межах кар'єру. Це завдає значної матеріальної шкоди гірничим підприємствам та порушує правила безпечної експлуатації

родовища. Зокрема, під зсувом можуть опинитися підготовлені до виймання запаси корисних копалин. В свою чергу, занижені кути укосів на кар'єрах викликають різке збільшення об'ємів розкривних робіт і призводять до значних прибортових втрат корисних копалин [2, 3].

Тому удосконалення технологій та конструктивних рішень щодо забезпечення стійкості укосів гірських масивів на об'єктах гірництва є актуальною інженерно-науковою задачею.

Метою досліджень є обґрунтування та встановлення параметрів захисної конструкції з буронабивних паль для зміцнення прибортового гірського масиву суглинків і моделювання стану борта кар'єру при дії на нього зовнішнього додаткового навантаження.

Матеріал і результати досліджень. Встановлення стійкості прибортового масиву кар'єру суглинків при додатковій дії на нього розподіленого навантаження виконаємо у програмному комплексі Rocscience Slide, використовуючи критерій міцності Mohr-Coulomb та метод аналізу Bishop, як одного з найбільш поширених і достовірних [6, 8].

За геологічними даними розроблювальної ділянки Жидачівського родовища суглинків, максимальна загальна потужність борта кар'єру може досягати $H=21$ м. Основні фізико-механічними характеристики суглинків даного родовища у природному стані, які необхідні для розрахунків, наступні:

- кут внутрішнього тертя – $\varphi_1 = 18^\circ$;
- питоме зчеплення пісків у гірському масиві – $c_1 = 29$ кПа;
- питома вага ґрунту – $\gamma_1 = 19,4$ кН/м³.

Згідно рекомендацій фахівців, природна стійкість борта на досліджуваній ділянці при мінімальних прибортових втратах забезпечується при куті укосу $\alpha=42^\circ$. Це підтверджується також і при моделюванні в Rocscience Slide.

За результатами моделювання стану кінцевого положення борта кар'єру Жидачівського родовища суглинків при додатковому зовнішньому навантаженні від дії автотранспорту встановлено, що мінімальне значення коефіцієнту стійкості становить $k_c=0,911$, тобто досліджуваний борт є зсувонебезпечним, рис. 1.

Запропоновано, для забезпечення стійкості укосу досліджуваної ділянки кар'єру, встановити захисну конструкцію з одного ряду буронабивних паль. Відповідно до характеристик палі, розрахована її довжина нижче рівня потенційної поверхні ковзання призми зсуву ($l=7,5$ м) та визначена загальна довжина паль, яка дорівнює 14 м.

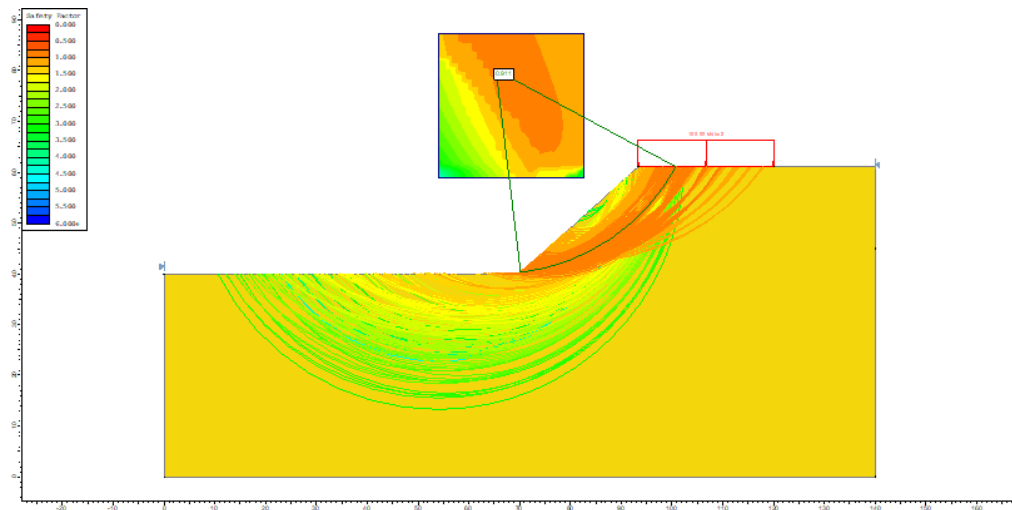


Рисунок. 1. Розподіл поверхонь ковзання в прибортовому масиві при додатковому навантаженні від автотранспорту ($q = 100$ кПа)

Моделювання показало, що застосування такої конструкції збільшило коефіцієнт стійкості до $k_c=1,099$, рис. 2.

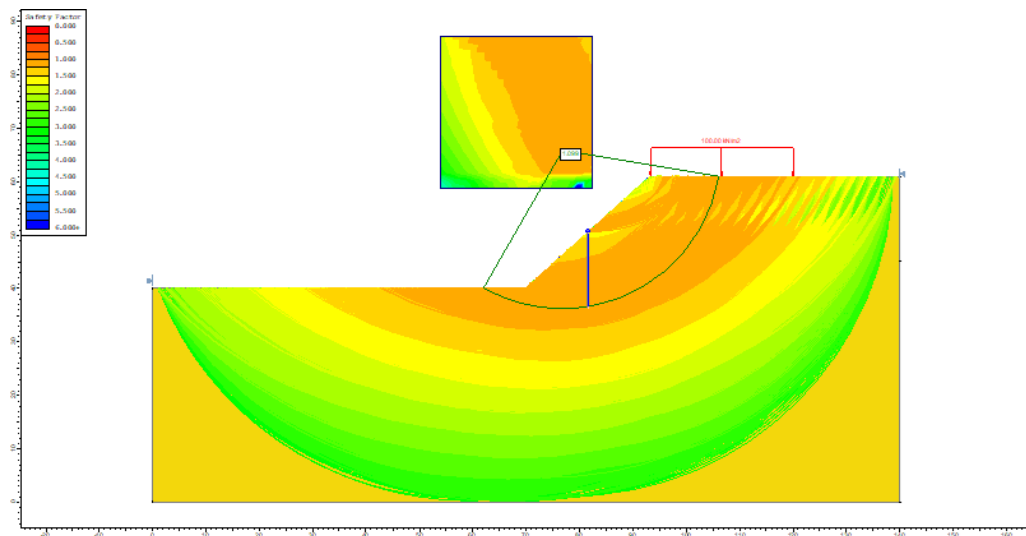


Рисунок 2. Розрахункова схема борта кар'єра при зовнішньому навантаженні, закріпленого конструкцією з буронабивних паль

Для розрахунку такої захисної споруди попередньо приймаємо наступні характеристики палі: діаметр палі – $d = 750$ мм; клас бетону – B15; клас арматури – A400; кількість та діаметр арматури – $8\text{Ø}18$ мм; товщина захисного шару арматури – $a_s = 50$ мм.

Утримуючу конструкцію з буронабивних паль розташуємо приблизно посередині укосу.

Для виконання нормативної вимоги із забезпечення стійкості укосів уступів і бортів кар'єрів ($k_c \geq 1,2$), рекомендовано застосувати підсилюючу конструкцію з двох рядів буронабивних паль, відстань між якими становить

4,5 м, довжина свердловин 1-го ряду – 16 м, 2-го ряду – 20 м. Коефіцієнт стійкості укосу борта кар'єра в цьому разі становить $k_c=1,218$, рис. 3.

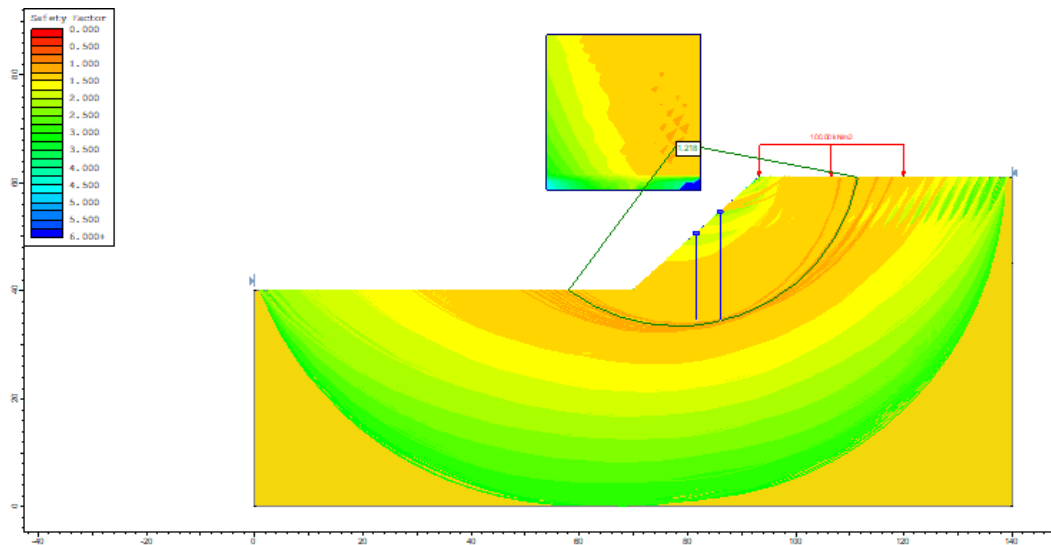


Рисунок 3. Стан стійкості прибортового масиву суглинків з прикладеним зовнішнім навантаженням, підсиленого двома рядами буронабивних паль

Висновки. За результатами аналізу існуючих наукових досліджень щодо забезпечення стійкості укосів, а саме способів зміцнення уступів та бортів кар'єрів, встановлено, що для умов Жидачівського родовища суглинків, при прояві загрози зсувних явищ, найбільш доцільним буде влаштування залізобетонних паль для підсилення небезпечних ділянок борта кар'єру.

Моделювання в Slide стану стійкості прибортового масиву на кар'єрі було виконано в його природному стані, з додатковим зовнішнім навантаженням та зі встановленням захисної конструкції.

За результатами моделювання кінцевого стану борта кар'єру Жидачівського родовища суглинків із додатковим зовнішнім навантаженням, спричиненим рухом автотранспорту ($q=100$ кПа), встановлено, що мінімальне значення коефіцієнта стійкості становить $k_c=0,911$ (за методом аналізу Bishop). Це свідчить про те, що досліджуваний борт кар'єру є зсувонебезпечним.

Для підвищення стійкості укосу в кінцевому положенні запропоновано встановлення захисної конструкції у вигляді одного ряду буронабивних паль. Відповідно до розрахункових параметрів, довжина паль нижче рівня потенційної поверхні ковзання зсуву становить $l=7,5$ м, а загальна довжина паль — 14 м. Моделювання підтвердило, що впровадження такої конструкції дозволяє збільшити мінімальний коефіцієнт стійкості до $k_c=1,099$, що забезпечує відносну стійкість борта.

Однак для виконання нормативних вимог щодо стійкості укосів уступів і бортів кар'єру, згідно з якими коефіцієнт стійкості має становити $k_c \geq 1,2$, доцільно застосувати підсилюючу конструкцію у вигляді двох рядів буронабивних паль. Оптимальна відстань між рядами становить 4,5 м, при

цьому довжина свердловин першого ряду складає 16 м, а другого – 20 м. Виконане моделювання підтвердило, що такий підхід забезпечує підвищення коефіцієнта стійкості до $k_c=1,218$, що відповідає нормативним вимогам і забезпечує необхідний рівень безпеки експлуатації кар'єру.

Список використаних джерел

1. Дзьоба М. В., Міщенко А. А. Фролов О. О. (2023) Проблема забезпечення стійкості укосів уступів і бортів кар'єрів. *Тези Всеукраїнської науково-практичної онлайн-конференції аспірантів, молодих учених та студентів, присвяченої Дню науки, Житомирська політехніка*, 154–155. URL: <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2023/06/hirnystvo.pdf> (дата звернення 14.03.2025).
2. Dzoba M. V. and Fastovshchuk V. M. (2023) Analysis of the causes of deformation of slopes in open-pit mine. *Збірник наукових праць XV науково-технічної конференції “Енергетика. Екологія. Людина”*, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 115–119. URL: <https://en.iee.kpi.ua/files/2023/dopovidi2023.pdf> (дата звернення 14.03.2025).
3. Dzoba M. V., Lytvynchuk I. D., Frolov O. O. (2023) Study of the stability of the working bench of quartz sands. *6th International Scientific and Technical Internet Conference “Innovative development of re-source-saving technologies and sustainable use of natural resources”*, Petroșani, Romania: UNIVERSITAS Publishing, 151–154. URL: https://www.upet.ro/cercetare/manifestari/Ukraine_2023_Book_of_Abstracts.pdf (дата звернення 14.03.2025).
4. *Норми технологічного проектування гірничо-видобувних підприємств з відкритим способом розробки родовищ корисних копалин*. (2007). *СОВ-Н МПП 73.020-078-1:2007*. Україна.
5. *Інженерний захист територій, будівель і споруд від зсувів та обвалів. Основні положення*. (2017). *ДБН В.1.1- 46:2017*. Україна.
6. Сайт компанії *ROCSCIENCE*, Inc. URL: <https://www.rocscience.com/help/slide2/tutorials/tutorials-overview/quick-start-tutorial> (дата звернення 14.03.2025).
7. Дзьоба М. В., Фролов О. О. (2024) Дослідження впливу кута укосу робочого уступу кварцових пісків на коефіцієнт його стійкості. *Збірник наукових праць НГУ*, 76, 51–62. URL: <https://doi.org/10.33271/crpnmu/76.051> (дата звернення 14.03.2025).
8. *Розробка та рекультивация ділянки західна Жидачівського родовища суглинків*. Робочий проєкт. (2024), Новий Розділ, Україна.

References

1. Dzoba M. V., Mishchenko A. A. and Frolov O. O. (2023) The problem of ensuring the stability of slopes of ledges and sides of quarries. Abstracts of the All-Ukrainian scientific and practical online conference of graduate students, young scientists and students dedicated to the Day of Science, Zhytomyr Polytechnic, 154–155. URL: <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2023/06/hirnystvo.pdf> (accessed 14.03.2025). (Ukr).
2. Dzoba M. V. and Fastovshchuk V. M. (2023) Analysis of the causes of deformation of slopes in open-pit mine. Collection of scientific papers of the XV scientific and technical conference “Energy. Ecology. Man”, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 115–119. URL: <https://en.iee.kpi.ua/files/2023/dopovidi2023.pdf> (accessed 14.03.2025). (Ukr).
3. Dzoba M. V., Lytvynchuk I. D. and Frolov O. O. (2023) Study of the stability of the working bench of quartz sands. 6th International Scientific and Technical Internet Conference “Innovative development of re-source-saving technologies and sustainable use of natural resources”, UNIVERSITAS Publishing, 151–154. URL: https://www.upet.ro/cercetare/manifestari/Ukraine_2023_Book_of_Abstracts.pdf (accessed 14.03.2025).

4. Norms of technological design of mining enterprises with an open method of development of mineral deposits. (2007). SOU-N MPP 73.020-078-1:2007. (Ukr).
5. Engineering protection of territories, buildings and structures against landslides and collapses. Basic provisions. (2017). DBN V.1.1-46: 2017. (Ukr).
6. Website of ROCSCIENCE, Inc. URL: <https://www.rocscience.com/help/slide2/tutorials/tutorials-overview/quick-start-tutorial>. (accessed 14.03.2025). (Ukr).
7. Dzoba M. V. and Frolov O. O. (2024) Study of the influence of the angle of slope of the working ledge of quartz sands on the coefficient of its stability. Collection of scientific works of NSU, 76, 51–62. URL: <https://doi.org/10.33271/crpnmu/76.051> (accessed 14.03.2025). (Ukr).
8. Development and reclamation of the western part of the Zhydachiv loam deposit. (2024), Novyi Rozdil. (Ukr).

УДК 621.316.7

Лісовик Б. А., аспірант, ORCID 0009-0008-3842-0832,
науковий керівник: канд. техн. наук, доцентка **О. В. Бориченко**,
Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

РОЛЬ, ПЕРЕВАГИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ОСТРОВІВ В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ

THE ROLE, ADVANTAGES AND PROSPECTS OF ENERGY ISLANDS IN ELECTRICAL POWER SYSTEMS

Анотація. У статті проведено аналіз деяких історичних прикладів енергетичних островів, зокрема “Енергетичного острова Західний Берлін” та “Буриштинського енергоострова”. Розглянуто ключові термінологічні аспекти: “енергетичний острів”, “острівна робота”, “навмисне кероване островування”. Досліджено концепцію енергетичних островів, їхню роль у підвищенні стійкості, надійності та гнучкості електроенергетичних систем, переваги та перспективи впровадження. Розглянуто особливості в питанні навмисного керованого островування системи. Бібл. 11.

Ключові слова: енергетичний острів, острівна робота, навмисне кероване островування.

Abstract. The article analyzes some historical examples of power islands, specifically the “West Berlin Power Island” and the “Burshtyn Energy Island”. The key terminological aspects are considered, including “power island”, “islanded operation”, and “intentional controlled islanding”. The concept of power islands is explored, along with their role in enhancing the resilience, reliability, and flexibility of electrical power systems, as well as the advantages and prospects of their implementation. The features of intentional controlled islanding within the system are also examined. Ref. 11.

Key words: power island, island operation, intentional controlled islanding.

Вступ. Електроенергетичні системи (ЕЕС) схильні до каскадних відключень при виникненні у них аварійних ситуацій, внаслідок чого може знеструмитись велика кількість споживачів або навіть вся ЕЕС (блекаут).

Одним із ефективних та перспективних підходів до пом'якшення наслідків таких подій є стратегія примусового поділу системи або її частини на незалежні та стійкі енергетичні острови, що дозволить знизити ризики масових знеструмлень, зберегти енергопостачання критичних об'єктів та підвищити надійність та гнучкість мережі.

Метою досліджень є аналіз концепції енергетичних островів та їхнього впливу на надійність і гнучкість електроенергетичних систем. Для досягнення поставленої мети в статті розв'язано такі завдання:

- розглянуто історичні приклади енергетичних островів;
- наведено та проаналізовано ключові терміни, що стосуються концепції енергетичних островів;
- досліджено основні переваги та виклики впровадження навмисного керованого островування (ICI);
- визначено деякі технічні аспекти поділу енергосистем на острови та їх подальшого функціонування.

Матеріал і результати досліджень. Ідея впровадження енергетичних островів не є новою. Наприклад з 1950-х років територія Західного Берліна була енергетичним островом (Energieinsel West-Berlin). Причиною цього слугувало припинення постачання електроенергії з НДР після Берлінської кризи 1948–1949 років, через що місто було змушене повністю забезпечувати себе електроенергією. Через це були створені великі резерви генерації та палива. Це тривало до 1970-х років, так як почали з'явилися спроби інтеграції Західного Берліна з сусідніми енергосистемами [1].

Україна не є винятком, у 2002–2022 роках в західній частині функціонував Бурштинський енергетичний острів (БЕО), який являв собою виокремлену з ОЕС України територію у 27 тис. км² з населенням близько 3 млн осіб, мав безпосередні міждержавні електричні зв'язки з державами країн ЄС (Угорщиною, Словаччиною та Румунією). До 2022 року був окремо від ОЕС України інтегрованим спочатку до спілки з координації передачі електроенергії (UCTE), згодом до європейської мережі операторів систем передачі електроенергії (ENTSO-E), відповідно працював синхронно з цими країнами. Складався БЕО з 4 електростанцій, 8 високовольтних підстанцій (ПС), повітряних високовольтних ліній електропередач (ЛЕП) (220 кВ – 750 кВ) загальною протяжністю понад 1000 км [2–4]. На відміну від енергетичного острова Західного Берліну, БЕО не був ізольованим та працював паралельно з енергосистемами трьох країн.

На сьогоднішній день існує досить значна кількість досліджень, присвячених напряму енергетичних островів, в яких пропонуються різні сценарії, стратегії та алгоритми для стійкої, гнучкої та надійної роботи островів. Серед таких робіт широкого вжитку набути наступні терміни:

Енергетичний острів (*power island*) – це ізольована електростанція або група ізольованих електростанцій разом із відповідним локальним навантаженням, що включає генераторне обладнання (газові та/або парові турбіни, парогенератори-утилізатори, котли), системи екологічного

контролю, допоміжне механічне та електричне обладнання, необхідне для автономного функціонування [5, 6].

Острівна робота (*island operation*) – незалежна робота цілої мережі або частини мережі, яка відключена та ізолювана від об'єднаної системи, що має принаймні один енергогенеруючий модуль або систему HVDC, що постачає енергію в цю мережу та контролює напругу і частоту [7].

Навмисне кероване островування (*intentional controlled islanding, ICI*) – це механізм навмисного відключення, передбачає від'єднання ЛЕП для створення стійких енергетичних островів із нестабільної об'єднаної системи, що дає змогу захисту груп споживачів від знеструмлення в суміжних мережах [8, 9].

ICI застосовується для поділу розподільчої системи на підсистеми, кожна з яких повинна ефективно балансувати генерацію та споживання та бути самодостатньою. Це необхідно по двом основним причинам [10]:

По-перше, для можливості від'єднання від основної мережі під час масштабних порушень.

По-друге, для зменшення навантаження на вище розташовані рівні енергосистеми.

Останнім часом ICI пропонується розглядати у якості коригувальної, адаптивної дії керування для ефективного поділу енергосистеми на самодостатні острови, але також тут виникають два основні питання: де ізолювати, та коли ізолювати.

У першому випадку питання спрямоване на пошук оптимального набору ЛЕП, які необхідно від'єднати, щоб розділити систему на електрично ізолювані острови. І тут виникають складнощі через особливість побудови систем передачі та систем розподілу:

- системи передачі спроектовані “активним”, оскільки в таких системах можна керувати потоками енергії, які між енергетичними вузлами можуть відбуватися в обох напрямках, тоді як системи розподілу є “пасивними”, мають обмежені можливості контролю, причому енергія передається в одному напрямі – від вищого рівня до нижчого;

- система передачі є більш надійною, так як ПС знаходяться в “транзиті”, тобто мають по декілька зав'язків іншими ПС (центрами живлення), що дозволяє енергії надходити до вузла з декількох напрямів, тоді як система розподілу зазвичай виконана радіальними або петлевими (кільцевими) схемами, де до вузла енергія надходить максимум з двох незалежних джерел;

- через різний рівень напруг та струмів системи передачі мають менші втрати ніж системи розподілу, тому це варто враховувати.

У другому випадку постає питання до визначення найбільш підходящого часу для ізолювання [9, 10].

Острівний режим потребує підтримки стабільної частоти, напруги, балансування потужності та адаптації до локальних умов. У розподільчих мережах на основі використання систем енергоменеджменту можливе

забезпечення тривалої роботи мережі в острівних режимах, водночас це вимагатиме модернізації мереж, що може потребувати значних інвестицій. Важливу роль у цьому процесі відіграє вдосконалення алгоритмів управління та синхронізації з основною мережею, необхідне для підвищення ефективності при переходах між режимами роботи та забезпечення стабільності системи [11].

У трьох розглянутих сценаріях розвитку островів для європейської синхронної системи передачі результати дослідження показують, що ІСІ забезпечує стійкі острови зі стабільною частотою в Європі для широкого діапазону режимів роботи як у поточних, так і в майбутніх сценаріях [8].

Висновки. Концепція поділу ЕЕС на енергетичні острови є досить прогресивним рішенням, що дозволяє підвищити стійкість, надійність та гнучкість ЕЕС. Окрім цього інтерес до даного напрямку підтверджується досить стрімким зростанням кількості авторитетних досліджень що проводяться у різних країнах.

Розглянуті у роботі історичні приклади показують, що раніше острови були “статичними”, де система не ділилась і острів був її нормальним режимом роботи, тоді як в розглянутій концепції ЕЕС стає “динамічною” та гнучкою, оскільки може ділитися у разі необхідності. Причому ця концепція не має чітко визначеного масштабу застосування, присутні обмеження пов’язані з особливостями побудови систем передачі та розподілу, і у разі врахування цього може бути одночасно реалізована в обох. З огляду на сучасну тенденцію до децентралізації, що набирає обертів упродовж останніх років і супроводжується активним впровадженням розосередженої генерації, значну частку якої становлять відновлювані джерела енергії, дана концепція має потенціал для розв’язання пов’язаних із цим викликів, причому значна частина сучасних досліджень зосереджена на цьому аспекті.

Список використаних джерел

1. LUDLOFF, Pál Leon. Oberjägerweg Blues. 2023. URL: <https://edoc.hu-berlin.de/server/api/core/bitstreams/9229cfdc-315a-4f79-931a-9a12d820b14a/content> (дата звернення 12.11.2024).
2. “Бурштинський острів” витримує усі тести щодо паралельної роботи з європейською енергосистемою. URL: https://web.archive.org/web/20170211075355/http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/article?art_id=93953&cat_id=35082 (дата звернення 10.12.2024).
3. ДЕКЛАРАЦІЯ відповідності матеріально-технічної бази роботодавця вимогам законодавства з питань охорони праці та промислової безпеки. URL: https://uz.dsp.gov.ua/images/pdf/Declar_vidpov/6.pdf (дата звернення 14.01.2025).
4. На підстанції 750 кВ “Західноукраїнська” введено в дію нові реактори. URL: <https://ua.energy/zagalni-novyny/na-pidstantsiyi-750-kv-zahidnoukrayinska-vvedeno-v-diyu-novi-reaktory/> (дата звернення 14.01.2025).
5. Abu Dhabi Transmission & Despatch Company. The Electricity Transmission Code. Version 2, Revision 1. Abu Dhabi: Department of Energy, 2016. URL: <https://www.doe.gov.ae/-/media/Project/DOE/Department-Of-Energy/Media-Center-Publications/English-Files/ELECTRICITY-TRANSMISSION-CODE-2016-Ver-02-Rev-1.pdf> (дата звернення 19.01.2025).

6. General Electric Company and Baker Hughes, a GE company, LLC. “Amended and Restated HDGT Distribution and Supply Agreement”. February 27, 2019. URL: <https://www.lawinsider.com/contracts/5AWeg5MpCGo#power-island> (дата звернення 25.02.2025).

7. European Commission. Commission Regulation (EU) 2016/631 of 14 April 2016 establishing a network code on requirements for grid connection of generators. Official Journal of the European Union, L 112, 27 April 2016. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:32016R0631&from=EN> (дата звернення 5.03.2025).

8. LIBRANDI, Mariano Dominguez, et al. Frequency stability of intentional controlled islanding scheme in the future European synchronous transmission grid. In: 2021 IEEE Madrid PowerTech. IEEE, 2021. p. 1–6. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9494977> (дата звернення 10.12.2024).

9. FERNÁNDEZ-PORRAS, Pablo; PANTELI, Mathaios; QUIRÓS-TORTÓS, Jairo. Intentional controlled islanding: when to island for power system blackout prevention. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12.14: 3542–3549. URL: <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1049/iet-gtd.2017.1526> (дата звернення 11.03.2025).

10. L’ABBATE, Angelo, et al. Distributed Power Generation in Europe: technical issues for further integration. JRC European Commission Scientific and Technical Report. EUR, 2007, 23234. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/38614105.pdf> (дата звернення 19.01.2025).

11. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). 4.5 Blaupause 12: Dauerhafter Betrieb eines Inselnetzes im Verteilnetz mittels dezentraler Erzeugung und Energiemanagement. 2024. URL: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Dossier/Sinteg/4-5-12-blaupause.pdf?__blob=publicationFile&v=6 (дата звернення 15.03.2025).

References

1. LUDLOFF, Pál Leon. Oberjägerweg Blues. 2023. URL: <https://edoc.hu-berlin.de/server/api/core/bitstreams/9229cfdc-315a-4f79-931a-9a12d820b14a/content> (accessed 12.11.2024).

2. “Burshtyn Island” passes all tests for parallel operation with the European power system. URL: https://web.archive.org/web/20170211075355/http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/article?art_id=93953&cat_id=35082 (accessed 10.12.2024). (Ukr).

3. DECLARATION of compliance of the employer’s material and technical base with the requirements of occupational safety and industrial safety legislation. URL: https://uz.dsp.gov.ua/images/pdf/Declar_vidpov/6.pdf (accessed 14.01.2025). (Ukr).

4. New reactors have been commissioned at the 750 kV "Zakhidnoukrainska" substation. URL: <https://ua.energy/zagalni-novyny/na-pidstantsiyi-750-kv-zahidnoukrayinska-vvedeno-v-diyu-novi-reactory/> (accessed 14.01.2025). (Ukr).

5. Abu Dhabi Transmission & Dispatch Company. The Electricity Transmission Code. Version 2, Revision 1. Abu Dhabi: Department of Energy, 2016. URL: <https://www.doe.gov.ae/-/media/Project/DOE/Department-Of-Energy/Media-Center-Publications/English-Files/ELECTRICITY-TRANSMISSION-CODE-2016-Ver-02-Rev-1.pdf> (accessed 19.01.2025).

6. General Electric Company and Baker Hughes, a GE company, LLC. “Amended and Restated HDGT Distribution and Supply Agreement. February 27, 2019. URL: <https://www.lawinsider.com/contracts/5AWeg5MpCGo#power-island> (accessed 25.02.2025).

7. European Commission. Commission Regulation (EU) 2016/631 of 14 April 2016 establishing a network code on requirements for grid connection of generators. Official Journal of the European Union, L 112, 27 April 2016. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:32016R0631&from=EN> (accessed 5.03.2025).

8. LIBRANDI, Mariano Dominguez, et al. Frequency stability of intentional controlled islanding scheme in the future European synchronous transmission grid. In: 2021 IEEE Madrid PowerTech. IEEE, 2021. p. 1–6. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9494977> (accessed 10.12.2024).

9. FERNÁNDEZ-PORRAS, Pablo; PANTELI, Mathaios; QUIRÓS-TORTÓS, Jairo. Intentional controlled islanding: when to island for power system blackout prevention. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12.14:3542–3549. URL: <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1049/iet-gtd.2017.1526> (accessed 11.03.2025).

10. L'ABBATE, Angelo, et al. Distributed Power Generation in Europe: technical issues for further integration. JRC European Commission Scientific and Technical Report. EUR, 2007, 23234. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/38614105.pdf> (accessed 19.01.2025).

11. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). 4.5 Blaupause 12: Dauerhafter Betrieb eines Inselnetzes im Verteilnetz mittels dezentraler Erzeugung und Energiemanagement. 2024. URL: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Dossier/Sinteg/4-5-12-blaupause.pdf?__blob=publicationFile&v=6 (accessed 15.03.2025).

УДК 621.311.24

Голуб В. А., аспірант, ORCID 0009-0004-0771-5671,
науковий керівник: канд. техн. наук, професор **Ю. О. Шепетов**,
Національний аерокосмічний університет ім. М.С. Жуковського
“Харківський авіаційний інститут”

ЗАСТОСУВАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ТОЧКИ МАКСИМАЛЬНОЇ ПОТУЖНОСТІ В СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЯХ

APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR MAXIMUM POWER POINT TRACKING IN SOLAR PANELS

Анотація. У статті досліджено застосування алгоритмів штучного інтелекту для визначення точки максимальної потужності (MPPT) у сонячних панелях. Проаналізовано ефективність традиційних методів MPPT та можливості використання машинного навчання для підвищення адаптивності системи та зменшення енергетичних втрат. Бібл. 8, рис. 1.

Ключові слова: штучний інтелект, MPPT, сонячні панелі.

Abstract. this article explores the application of artificial intelligence algorithms for Maximum Power Point Tracking (MPPT) in solar panels. The effectiveness of traditional MPPT methods is analyzed, along with the potential of machine learning to enhance system adaptability and reduce energy losses. Ref. 8, Fig. 1.

Keywords: artificial intelligence, MPPT, solar panels.

Вступ. У сучасному світі спостерігається зростаючий попит на відновлювані джерела енергії, серед яких провідну позицію займає сонячна енергетика. Важливим фактором підвищення ефективності сонячних електростанцій є визначення та стабільне підтримання точки максимальної потужності (MPPT). Традиційні методи MPPT, такі як збурення та спостереження (P&O) і метод інкрементальної провідності, мають низку

суттєвих недоліків, серед яких низька точність і схильність до нестабільності роботи за умов швидких змін температури й освітленості, а також недостатня адаптивність до індивідуальних характеристик панелей (наприклад, при частковому затіненні чи нерівномірному зношенні) [5]. Перераховані недоліки спричиняють зниження загальної продуктивності сонячних установок та збільшення експлуатаційних витрат.

З огляду на ці обмеження актуальним напрямом є впровадження інтелектуальних підходів до оптимізації роботи МРРТ на основі алгоритмів штучного інтелекту (ШІ), зокрема методів машинного навчання. Використання ШІ дозволяє створювати адаптивні системи, які здатні оперативно реагувати на зміну умов роботи, прогнозувати оптимальні параметри роботи сонячних панелей, а також знижувати енергетичні втрати та підвищувати стабільність роботи системи.

Мета дослідження полягає у визначенні можливостей і переваг застосування алгоритмів штучного інтелекту для оптимізації процесу визначення точки максимальної потужності (МРРТ) у сонячних панелях. Для досягнення цієї мети здійснюється порівняльний аналіз традиційних і сучасних (ШІ) методів МРРТ, зокрема оцінюється ефективність нейронних мереж та інших моделей машинного навчання. Окрему увагу приділено практичним аспектам інтеграції ШІ в системи МРРТ для формування рекомендацій щодо їх впровадження в реальних умовах експлуатації.

Матеріал досліджень. Для досягнення поставленої мети у дослідженні використано метод порівняльного аналізу, що включає огляд та оцінку традиційних алгоритмів МРРТ і сучасних підходів на базі штучного інтелекту. Проведене дослідження дозволило виділити найбільш розповсюджені традиційні алгоритми МРРТ, такі як:

- метод збурення та спостереження (*Perturb and Observe, P&O*) – полягає у постійному внесенні невеликих змін напруги або струму панелі та спостереженні за реакцією вихідної потужності, що дозволяє знаходити точку максимальної ефективності шляхом послідовних наближень;
- метод інкрементальної провідності (*Incremental Conductance, INC*) – базується на аналізі похідної потужності від напруги і дозволяє точніше визначати положення максимальної точки потужності за умови швидких змін зовнішніх умов, однак він є більш складним у реалізації;
- метод постійної напруги (*Constant Voltage*) – використовує заздалегідь задані параметри, менш адаптивний, але простий у реалізації.

Кожен із зазначених методів має певні недоліки, зокрема недостатню точність, низьку адаптивність до швидких змін зовнішніх умов, що підтверджує доцільність дослідження можливостей застосування алгоритмів на основі штучного інтелекту.

Алгоритми відстеження точки максимальної потужності у сонячних панелях, такі як метод збурення та спостереження (P&O) та метод інкрементальної провідності, зазвичай складаються з наступних етапів:

1. Вимірювання параметрів:

- збір даних – вимірювання ключових параметрів сонячної панелі, зокрема напруги (V) та струму (I);
- обчислення потужності – розрахунок миттєвої потужності ($P = V \times I$) на основі виміряних значень.

2 Аналіз та визначення напрямку коригування:

- оцінка змін – порівняння поточної потужності з попередніми значеннями для визначення тенденції зміни;
- визначення напрямку – встановлення, чи потрібно збільшити або зменшити напругу для досягнення точки максимальної потужності.

3. Коригування робочої точки:

- регулювання параметрів – внесення змін до напруги або струму панелі відповідно до визначеного напрямку;
- стабілізація – очікування стабілізації системи після коригування перед наступним вимірюванням.

4. Циклічне повторення:

- постійний моніторинг – безперервне повторення вищезазначених етапів для забезпечення роботи панелі в точці максимальної потужності в умовах змінного освітлення та температури.

Визначено, що традиційні алгоритми MPPT мають ряд спільних характеристик, які визначають їхню ефективність у керуванні сонячними панелями. Основним принципом роботи як методу збурення та спостереження (P&O), так і методу інкрементальної провідності (INC) є безперервне вимірювання параметрів електричної системи, зокрема напруги та струму. Такий підхід дозволяє відстежувати зміни в генерації енергії та своєчасно коригувати робочу точку. Обидва методи також використовують механізм адаптивного налаштування для підтримки максимальної потужності, що забезпечує підвищену ефективність фотоелектричних систем.

Але не дивлячись на загальну концепцію, методи відрізняються підходами до коригування робочої точки. Наприклад, метод збурення та спостереження (P&O) працює за принципом внесення невеликих змін у напругу та аналізу реакції потужності. Якщо збільшення або зменшення напруги призводить до збільшення потужності, коригування продовжується в тому ж напрямку. У разі зменшення потужності напрямок зміни напруги змінюється. Такий підхід є простим у реалізації, проте може спричиняти коливання робочої точки навколо оптимального значення.

В свою чергу метод інкрементальної провідності (INC) використовує більш точний підхід, базуючись на обчисленні похідних струму та напруги, що дозволяє визначати положення точки максимальної потужності без необхідності постійного збурення напруги, забезпечуючи швидшу реакцію на зміни умов освітлення. Завдяки цій особливості INC є ефективнішим у динамічних середовищах, але потребує складніших обчислень, що може впливати на швидкодію системи.

Аналізуючи етапи традиційних алгоритмів MPPT, можна визначити, що найбільший потенціал для впровадження III має етап аналізу та

визначення напрямку коригування. Використання моделей машинного навчання, таких як нейронні мережі або трансформери в перспективі дозволить:

- прогнозувати оптимальну робочу точку;
- покращити адаптивність системи;
- зменшити коливання потужності.

Прогнозування оптимальної робочої точки за допомогою штучного інтелекту ґрунтується на аналізі історичних даних та поточних умов навколишнього середовища. Нейронні мережі здатні виявляти складні залежності між параметрами, такими як освітленість, температура, напруга та струм, що дозволяє передбачати положення точки максимальної потужності без необхідності внесення збурень. Покращена адаптивність системи досягається за рахунок швидкої реакції ШІ на зміну зовнішніх умов. На відміну від традиційних алгоритмів, які потребують декількох ітерацій для коригування параметрів, штучний інтелект може миттєво розраховувати оптимальні значення, мінімізуючи втрати енергії. Зменшення коливань потужності відбувається завдяки тому, що ШІ усуває потребу у постійному збуренні системи, що характерно для методу Р&О. Це забезпечує більш стабільну роботу сонячних панелей і зменшує зношення обладнання внаслідок частих змін робочих параметрів.

Таким чином, інтеграція ШІ в процес МРРТ може значно підвищити ефективність роботи сонячних панелей, особливо в умовах нестабільного освітлення та інших змінних факторів.

Застосування штучного інтелекту для визначення точки максимальної потужності (МРРТ) вимагає вибору відповідних моделей, які забезпечують високу точність прогнозування та швидку реакцію на зміну умов навколишнього середовища. Основними критеріями вибору є здатність алгоритму адаптуватися до динамічних змін параметрів системи, швидкість обчислень та енергоефективність реалізації.

Одним із перспективних підходів є використання нейронних мереж, зокрема рекурентних нейронних мереж (RNN) та їх удосконалених версій, таких як LSTM (*Long Short-Term Memory*) і GRU (*Gated Recurrent Unit*). Вони добре підходять для аналізу часових рядів, що дозволяє прогнозувати зміну потужності сонячних панелей на основі попередніх значень. Глибокі нейронні мережі (DNN) також можуть бути застосовані для обробки великого обсягу даних, отриманого з фотоелектричних систем, проте вони вимагають значних обчислювальних ресурсів.

Крім нейронних мереж, для задач МРРТ ефективними є методи машинного навчання, такі як методи опорних векторів (SVM) для класифікації та регресії та алгоритми градієнтного бустингу (XGBoost, LightGBM), які дозволяють аналізувати нелінійні залежності між параметрами системи та робити точні прогнози. Також перспективним напрямком є використання трансформерних моделей, які можуть швидко адаптуватися до змін навколишнього середовища без втрати точності.

Вибір конкретної моделі залежить від умов експлуатації системи МРРТ, доступних обчислювальних ресурсів та вимог до швидкодії алгоритму. Комбінація різних підходів, таких як гібридні нейронні мережі або ансамблеві методи, дозволяє досягти найкращих результатів в оптимізації роботи сонячних панелей.

Застосування штучного інтелекту для оптимізації процесу визначення точки максимальної потужності (МРРТ) у сонячних панелях вимагає ретельної підготовки та навчання моделей машинного навчання. Процес складається з кількох ключових етапів, таких збір даних, підготовка даних та навчання моделі (рис. 1).

Модель навчається на тренувальному наборі, після чого її точність перевіряється на валідаційних даних. Параметри моделі оптимізуються шляхом підбору гіперпараметрів, таких як швидкість навчання, кількість нейронів та глибина архітектури. Після досягнення прийнятного рівня точності модель тестується на реальних даних і інтегрується в систему МРРТ.

Використання такого підходу дозволяє підвищити ефективність сонячних панелей, зменшити втрати енергії та покращити адаптивність системи до змін навколишнього середовища.

Впровадження алгоритмів штучного інтелекту для визначення точки максимальної потужності (МРРТ) у сонячних панелях

дозволяє суттєво підвищити ефективність роботи системи в порівнянні з традиційними методами. Основні критерії оцінки ефективності включають точність визначення оптимальної робочої точки, швидкість реагування на зміни навколишніх умов та стабільність роботи системи.

Традиційні методи, такі як метод збурення та спостереження (P&O) та метод інкрементальної провідності (INC), демонструють задовільні результати у стабільних умовах, але мають ряд обмежень. Зокрема, метод P&O має тенденцію до коливань навколо точки максимальної потужності, що призводить до втрат енергії. Метод INC є більш точним, проте вимагає значних обчислювальних ресурсів та може давати похибки за умов різких змін освітленості.

Застосування нейронних мереж (LSTM, DNN) та градієнтного бустингу (XGBoost, LightGBM) дозволяє отримати точніші прогнози точки максимальної потужності, оскільки ці моделі враховують як поточні



Рисунок 1. Процес навчання моделей МРРТ

параметри системи, так і історичні тенденції. Дослідження показують, що використання ШІ-методів забезпечує:

- зменшення коливань робочої точки – до 80 % у порівнянні з методом P&O;
- швидшу реакцію на зміну умов – адаптація відбувається у 2-3 рази швидше, ніж у традиційних алгоритмів;
- підвищення ефективності роботи сонячних панелей – коефіцієнт корисної дії (ККД) системи може зрости на 5-10 %.

Таким чином, результати аналізу підтверджують, що інтеграція алгоритмів штучного інтелекту в систему МРРТ дозволяє значно підвищити її адаптивність, точність та стабільність, що особливо важливо для реальних умов експлуатації сонячних електростанцій.

Впровадження алгоритмів штучного інтелекту в системи МРРТ відкриває нові можливості для підвищення ефективності сонячних панелей, проте супроводжується низкою викликів. Основними перевагами є підвищена точність визначення точки максимальної потужності, швидша адаптація до змінних умов та зменшення енергетичних втрат. Однак інтеграція ШІ потребує значних обчислювальних ресурсів, що може збільшити витрати на обладнання та ускладнити впровадження у малопотужних автономних системах. Крім того, ефективність таких алгоритмів залежить від якості та обсягу навчальних даних, що потребує постійного оновлення та коригування моделі. Успішна реалізація ШІ-методів у МРРТ вимагає комплексного підходу, що включає вибір оптимальних алгоритмів, належне навчання моделей та врахування апаратних обмежень системи.

Висновки. Результати дослідження показали, що застосування алгоритмів штучного інтелекту в системах МРРТ дозволяє значно підвищити точність визначення точки максимальної потужності, зменшити енергетичні втрати та швидше адаптуватися до змінних умов навколишнього середовища. Практичне значення впровадження ШІ полягає в оптимізації роботи сонячних панелей, що сприяє збільшенню їхньої продуктивності та стабільності в реальних умовах експлуатації. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на розробку більш енергоефективних моделей машинного навчання, інтеграцію ШІ з хмарними платформами для прогнозування роботи сонячних електростанцій та створення адаптивних МРРТ-контролерів із самонавчанням, що дозволить ще більше підвищити ефективність використання відновлюваних джерел енергії.

Список використаних джерел

1. Трансформерна модель прогнозування часових рядів для точки максимальної потужності сонячних фотоелектричних елементів. arXiv. URL: <https://arxiv.org/abs/2409.16342> (дата звернення 15.03.2025).
2. Система керування сонячним генератором електроенергії (2018). URL: <https://events.pstu.edu/konkurs-energy/wp-content/uploads/sites/2/2018/03/Сонце.pdf> (дата звернення 15.03.2025).

3. Фотоелектрична станція: вдосконалення моделей графічного програмування з використанням штучного інтелекту. URL: https://er.knutd.edu.ua/bitstream/123456789/19942/1/SEIS_mono_2021_P142-150.pdf (дата звернення 15.03.2025).

4. Технології майбутнього: інтелектуальні сонячні інвертори. URL: <https://www.sig.energy/tehnologiyi-majbutnogo-intelektualni-sonyachni-invertory/> (дата звернення 15.03.2025).

5. Актуальні задачі сучасних технологій. Матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів, 28-29 листопада 2018 року. Тернопіль: ТНТУ, 2018. URL: <https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/26291/1/Book%202-2018.pdf> (дата звернення 15.03.2025).

6. Електротехнічні та комп'ютерні системи. Науковий журнал. URL: <https://eltechs.op.edu.ua> (дата звернення 15.03.2025)/

7. Пайташ Ю. А., Паранчук Я. Порівняльний аналіз алгоритмів відстеження точки максимальної потужності фотоелектричної панелі // SEPES. 2024. Вип. 6, № 1. С. 72–83. DOI: 10.23939/sepes2024.01.072.

8. Казначеева А. В. Використання технік машинного навчання для оптимізації роботи сонячних панелей // Есе. ДУІКТ, 2024.

References

1. Transformer-based time series prediction of the maximum power point for solar photovoltaic cells. URL: <https://arxiv.org/abs/2409.16342> (accessed 15.03.2025).

2. Control system of a solar power generator. URL: <https://events.pstu.edu/konkurs-energy/wp-content/uploads/sites/2/2018/03/Сонце.pdf> (accessed 24.03.2025). (Ukr).

3. Photovoltaic power plant: improvement of graphical programming models using artificial intelligence. URL: https://er.knutd.edu.ua/bitstream/123456789/19942/1/SEIS_mono_2021_P142-150.pdf (accessed 15.03.2025). (Ukr).

4. Future technologies: intelligent solar inverters. URL: <https://www.sig.energy/tehnologiyi-majbutnogo-intelektualni-sonyachni-invertory/> (accessed 15.03.2025). (Ukr).

5. Current Issues of Modern Technologies. Proceedings of the VII International Scientific and Technical Conference of Young Scientists and Students, November 28–29, 2018. Ternopil: TNTU. URL: <https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/26291/1/Book%202-2018.pdf> (accessed 15.03.2025). (Ukr).

6. Electrotechnical and Computer Systems. Scientific Journal. URL: <https://eltechs.op.edu.ua> (accessed 15.03.2025). (Ukr).

7. Paitash Yu. A., Paranchuk Ya. Comparative Analysis of Maximum Power Point Tracking Algorithms for a Photovoltaic Panel // SEPES. 2024. vol. 6, No. 1. pp. 72–83. DOI: 10.23939/sepes2024.01.072. (Ukr).

8. Kaznacheieva A. V. Use of Machine Learning Techniques for Optimizing the Performance of Solar Panels // Essay. DUKIT, 2024. (Ukr).

Пашкевич Б. П., аспірант, ORCID 0009-0004-8598-1940,
науковий керівник: канд. техн. наук, доцент **В. П. Калінчик**,
Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

ВИКОРИСТАННЯ ДВОСТОРОННІХ (BIFACIAL – БІФРАКЦІЙНІ) СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СЕС

USING BIFACIAL SOLAR PANELS TO ENHANCE THE ENERGY EFFICIENCY OF SOLAR POWER PLANTS

Анотація. У роботі розглядається покращення енергоефективності сонячних електростанцій (СЕС) за допомогою біфракційних (bifacial) сонячних панелей. Описано їхні переваги перед традиційними односторонніми модулями, зокрема здатність генерувати електроенергію від прямого та відбитого сонячного випромінювання. Аналізуються можливі варіанти застосування таких панелей, зокрема їх встановлення у вигляді парканів, шумозахисних бар'єрів уздовж автомагістралей, інтеграція у фасади будівель та використання в агровольтаїці. Особлива увага приділяється застосуванню дзеркальних рефlectorів для підвищення ефективності роботи панелей за рахунок спрямованого відбиття сонячного світла. Використання цих технологій сприяє більш ефективному використанню земельних ресурсів, збільшенню генерації електроенергії та розвитку відновлюваної енергетики. Бібл. 4.

Ключові слова: біфракційні сонячні панелі, енергоефективність, сонячна електростанція, відновлювана енергетика, дзеркальні рефlectorи, агровольтаїка, сонячний паркан, інтегровані сонячні панелі.

Abstract. The paper examines the improvement of energy efficiency in solar power plants (SPPs) through the use of bifacial solar panels. Their advantages over traditional single-sided modules are described, particularly their ability to generate electricity from both direct and reflected sunlight. Possible applications of such panels are analyzed, including their installation as fences, noise barriers along highways, integration into building facades, and use in agrivoltaics. Special attention is given to the application of mirror reflectors to enhance panel efficiency by directing reflected sunlight. The implementation of these technologies contributes to more efficient land use, increased electricity generation, and the advancement of renewable energy. Ref. 4.

Keywords: bifacial solar panels, energy efficiency, solar power plant, renewable energy, mirror reflectors, agrivoltaics, solar fence, integrated solar panels.

Вступ. Біфракційні сонячні панелі є важливим технологічним рішенням для підвищення ефективності сонячних електростанцій, оскільки вони здатні генерувати електроенергію як від прямого сонячного світла, так і від відбитого. Це робить їх значно продуктивнішими у порівнянні з традиційними односторонніми панелями. Завдяки цьому їх застосування може сприяти зростанню виробництва відновлюваної енергії та підвищенню енергоефективності сонячних електростанцій. Біфракційні панелі можна встановлювати вертикально, що дає можливість отримувати максимум енергії вранці та ввечері, коли традиційні системи працюють менш

ефективно. Одним із варіантів використання таких панелей є їхнє застосування у вигляді паркану, що дозволяє поєднати функцію огорожі та виробництва електроенергії без потреби у додаткових площах для монтажу сонячних батарей. Вертикальні сонячні панелі можуть забезпечити стабільну генерацію енергії незалежно від пори року і положення сонця, що є значною перевагою для регіонів із високою відбивною здатністю поверхні, наприклад, у сніжних зонах. Установлення панелей як паркану дає змогу створювати компактні сонячні ферми вздовж доріг або на території підприємств, що сприяє ефективному використанню простору [1].

Крім того, одним з інноваційних рішень для підвищення ефективності біфракційних сонячних панелей є використання дзеркальних рефлекторів. Вони дозволяють спрямовувати додаткове сонячне випромінювання на зворотний бік панелі, що підвищує рівень генерації електроенергії. Оптимальне розміщення рефлекторів може збільшити загальну продуктивність сонячних установок на 10–30 % залежно від матеріалу поверхні, що відбиває світло, та кута нахилу панелей. Використання таких технологій є доцільним у регіонах із помірним або холодним кліматом, де значна частина світла може розсіюватися або відбиватися від поверхонь, таких як сніг або бетон. Для максимального ефекту слід враховувати місцеві умови, такі як кут падіння сонячних променів, тип місцевості та погодні умови [4].

Зі збільшенням попиту на чисту енергію все більше домовласників обирають встановлення сонячних панелей як огорожі для своїх будинків. Цей інноваційний підхід не лише дозволяє зекономити простір та матеріали для огорожі, а й інтегрує джерело відновлювальної енергії в будівлю. Як і будь-яка нова технологія, він має свої переваги та недоліки. Одним із головних плюсів є економія простору: традиційна огорожа зазвичай потребує великих стовпів або стін, що займають значну площу, в той час як сонячні панелі можуть виконувати функцію огорожі без додаткових площ. Крім того, це економічно вигідно, оскільки заощаджує кошти на будівельних матеріалах, таких як дерево, метал чи цегла. З часом електроенергія, яку виробляють сонячні панелі, може частково компенсувати витрати на споживання електричної енергії в будинку [2].

Біфракційні сонячні панелі також можуть бути використані для агровольтаїки – поєднання сонячних станцій із сільськогосподарською діяльністю. Їхнє встановлення над посівами допомагає захищати рослини від надмірного сонячного випромінювання, а також сприяє ефективному використанню земельних ресурсів. Завдяки цьому можна не тільки виробляти електроенергію, але й підтримувати стабільний мікроклімат для рослин, що позитивно впливає на врожайність. Ще одним варіантом застосування є інтеграція біфракційних панелей у фасади будівель, що дозволяє поєднати естетичні та енергетичні функції. Прозорі біфракційні панелі можуть використовуватися як елементи віконного скління, пропускаючи певну частину світла для освітлення приміщень, а також генеруючи

електроенергію. Це особливо актуально для сучасних “зелених” будівель, які орієнтуються на зниження споживання традиційної енергії [3].

Також одним з можливих варіантів використання біфракційних панелей є встановлення їх уздовж автомагістралей у вигляді шумозахисних бар’єрів. Поєднання цих функцій дозволяє одночасно зменшувати рівень шуму від транспортного потоку та виробляти електроенергію, що робить такі конструкції вигідними з економічної та екологічної точки зору. При такому використанні важливим є вибір матеріалу та кута встановлення, щоб забезпечити максимально ефективне відбиття світла та уникнути перегріву панелей.

Біфракційні сонячні панелі мають значний потенціал для покращення енергоефективності та розширення сфери застосування сонячної енергетики. Вони можуть використовуватися як частина інфраструктури міст, замінювати традиційні сонячні панелі на дахах, а також служити додатковим джерелом електроенергії у різних сферах – від промисловості до приватного сектора. Інноваційні технології, такі як використання дзеркальних рефлекторів, дозволяють збільшити продуктивність установок та зробити сонячну енергію ще доступнішою та вигіднішою для використання. Біфракційні панелі можуть стати важливим елементом розвитку відновлюваної енергетики, особливо в умовах зростання попиту на екологічно чисту електроенергію та необхідності зменшення викидів вуглекислого газу. Враховуючи їхню ефективність, компактність і можливість використання в різних умовах, можна очікувати подальше зростання інтересу до таких технологій та їхнє широке впровадження найближчими роками [3].

Метою досліджень є комплексний аналіз підвищення енергоефективності сонячних електростанцій (СЕС) шляхом використання біфракційних (bifacial) сонячних панелей та дзеркальних рефлекторів. Дослідження охоплює новітні підходи до оптимального розташування таких панелей, зокрема у вигляді парканів, шумозахисних бар’єрів та інтеграції у міську інфраструктуру.

Значущість роботи полягає в:

- оцінці можливості збільшення вироблення електроенергії за рахунок відбитого світла від різних поверхонь,
- дослідженні впливу дзеркальних рефлекторів на продуктивність біфракційних модулів,
- розгляді агровольтаїчного застосування як перспективного напряму синергії сонячної енергетики та сільського господарства,
- визначенні перспективи використання вертикально встановлених панелей для оптимізації використання простору.

Отримані результати можуть сприяти підвищенню ефективності існуючих та майбутніх СЕС, а також розширенню сфер застосування біфракційних сонячних панелей у міських та сільськогосподарських умовах.

Матеріал і результати досліджень. У статті детально розглянуто перспективи використання біфракційних сонячних панелей для підвищення енергоефективності сонячних електростанцій. Завдяки здатності генерувати

електроенергію як від прямого, так і відбитого сонячного випромінювання, біфракційні панелі дозволяють значно збільшити продуктивність установки. Це дає змогу не лише збільшити виробництво відновлювальної енергії, але й ефективно використовувати земельні ресурси, зокрема через інтеграцію таких панелей у будівельні конструкції, агровольтаїку або як частину міської інфраструктури.

Використання інноваційних технологій, таких як дзеркальні рефлектори для спрямування сонячного світла на зворотну сторону панелей, здатне підвищити їх продуктивність на 10–30 %. Це особливо актуально для регіонів з холодним кліматом, де відбиття світла може значно сприяти енергетичній ефективності. Зокрема, використання біфракційних панелей у вигляді парканів або шумозахисних бар'єрів дозволяє комбінувати функціональність енергогенерації та зниження рівня шуму, що є вигідним як з економічної, так і з екологічної точки зору.

Висновки. У результаті дослідження встановлено, що біфракційні сонячні панелі мають великий потенціал для розвитку відновлювальної енергетики. Вони здатні стати важливим елементом енергетичної інфраструктури, зокрема у міських та сільськогосподарських умовах. Зважаючи на ефективність, компактність і можливість використання в різних кліматичних умовах, очікується подальше розширення їх застосування в майбутньому, що позитивно вплине на розвиток енергетичних технологій та зниження викидів вуглекислого газу.

Список використаних джерел

1. Альтернативна енергетика для Вашого будинку. URL: <https://magus.com.ua/ua/a435351-cho-takoe-bifacial.html> (дата звернення 17.03.2025).
2. Використання сонячних батарей як огорожі: переваги та недоліки. URL: <https://ua.jingsun-power.com/info/using-solar-panels-as-fencing-advantages-and-95833369.html> (дата звернення 17.03.2025).
3. Двосторонні сонячні панелі: особливості конструкції і перспективи застосування URL: <https://grand-overon.in.ua/alternativnaya-energetika-stati/dvostoronnn-sonyachn-panel-osoblivost-konstrukc-perspektivi-zastosuvannya-uk.html> (дата звернення 17.03.2025).
4. Як працюють двосторонні сонячні панелі (Bifacial)? URL: https://solarsystem.com.ua/solar-panels-bifacial/?srsltid=AfmBOoo4LWfJMK2NQEW113zQt1XmroXJp1v_Fbm3HNBMIjP0d26808HS (дата звернення 17.03.2025).

References

1. Alternative Energy for Your Home. URL: <https://magus.com.ua/ua/a435351-cho-takoe-bifacial.html> (accessed March 17, 2025). (Ukr).
2. Use of Solar Panels as Fencing: Advantages and Disadvantages. URL: <https://ua.jingsun-power.com/info/using-solar-panels-as-fencing-advantages-and-95833369.html> (accessed March 17, 2025). (Ukr).
3. Bifacial Solar Panels: Design Features and Application Prospects. URL: <https://grand-overon.in.ua/alternativnaya-energetika-stati/dvostoronnn-sonyachn-panel-osoblivost-konstrukc-perspektivi-zastosuvannya-uk.html> (accessed March 17, 2025). (Ukr).
4. How Do Bifacial Solar Panels Work? URL: https://solarsystem.com.ua/solar-panels-bifacial/?srsltid=AfmBOoo4LWfJMK2NQEW113zQt1XmroXJp1v_Fbm3HNBMIjP0d26808HS (accessed March 17, 2025). (Ukr).

СТРАТЕГІЧНІ ПЕРСПЕКТИВИ ПАЛИВНО-ЕНЕРГЕТИЧНИХ РЕСУРСІВ

STRATEGIC PROSPECTS OF FUEL AND ENERGY RESOURCES

Анотація. В статті досліджено аспекти перспективного розвитку паливно-енергетичного комплексу України. Бібл. 2, рис. 1.

Ключові слова: паливно-енергетичний комплекс, ресурсозабезпечення.

Abstract. The paper examines aspects of the fuel and energy complex of Ukraine prospective development. Ref. 2, Fig. 1.

Keywords: fuel and energy complex, resource provision.

Вступ. Забезпеченість паливно-енергетичними ресурсами, безперебійність поставок й ефективність їх використання в основному визначають стійкий розвиток і енергетичну безпеку як важливу складову національної безпеки будь-якої країни. Безумовно, що державне регулювання ресурсозабезпечення потребує постійного аналізу й оцінок використання енергетичних корисних копалин та прогнозування перспектив зростання обсягів їх геологічних запасів.

Ресурсометрія як окрема складова ресурсогеології, треба розуміти, досліджує процеси підготовки, оцінки та підрахунку ресурсів і запасів паливно-енергетичних корисних копалин. У числі її досліджуваних показників в першу чергу слід прийняти статистичні за різними методами. На рис. 1 наведено світове споживання енергії як загальної енергії, яка використовується всією людською цивілізацією [2].

У країнах світу поширюються власні конкретні енергетичні стратегії щодо формування перспективних потреб в енергогенерації, використанні енергоресурсів для забезпечення ними енергоспоживачів. Данія і Німеччина за енергетичних потреб інвестиціями розвивають засоби сонячної енергії, вітрогенерацію. Франція вклала значні кошти в ядерну енергетику, тому три чверті її електроенергетичних ресурсів виробляється ядерними реакторами. Бразилія установила потреби в економії споживання нафтопродуктів, тому розвиває виробництво етанолу з цукрової тростини як значної частини транспортного пального. Велика Британія за стратегію прийняла впровадження нормативів для будівництва

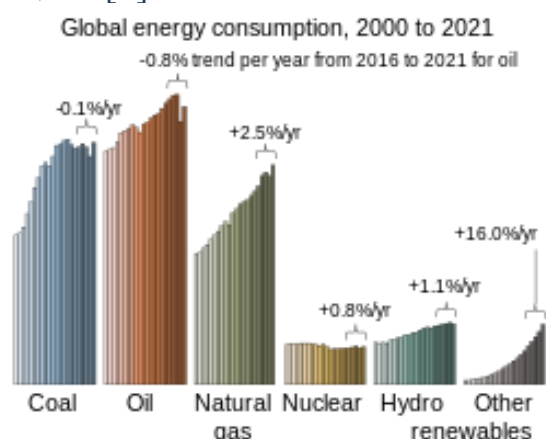


Рисунок 1. Світове споживання різних видів енергетичних носіїв

нових споруд відповідно принципу “Будинок з нульовим споживанням енергії”. Китай дотримується стратегії сталої енергетики, скорочення споживання енергії у валовому внутрішньому продукті. Стратегією Швейцарії є скорочення споживання енергії не менше ніж наполовину, до 2050 року стати “Спільнотою 2000 Вт” (в результаті знизити середньорічне споживання первинної енергії однією людиною за годину до 2000 Вт, майже в три рази менше від теперішнього показника) [2].

У Національній економічній стратегії на період до 2030 року, затв. постановою Кабінету Міністрів України від 3 березня 2021 р. № 179 до складу “Цільові індикатори – 2030” України входять:

1) стратегічна ціль “Забезпечення високого рівня енергетичної безпеки та інтеграція України в європейський енергетичний ринок”;

2) стратегічна ціль “Підвищення енергоефективності економіки та забезпечення екологічності енергетичного сектору”, яка охоплює:

- зменшення вуглецевого сліду паливно-енергетичного комплексу; залучення 10 млрд доларів США інвестицій у відновлювану енергетику;
- скорочення частки вугільної генерації;
- формування частки генерації з відновлювальних джерел енергії в загальному виробництві електроенергії на рівні 25 %;
- збільшення утилізації відходів паливно-енергетичного комплексу;

3) стратегічна ціль “Забезпечення гармонізації галузі з навколишнім середовищем”, яка охоплює:

- забезпечення функціонування видобувної промисловості відповідно до екологічних стандартів;
- зниження енергоемності видобувної промисловості на 30 %;
- збільшення на 50 % перероблених та повторно використаних відходів, отриманих під час видобутку корисних копалин;
- забезпечення реабілітації 100 % територій, де відбувався видобуток.

Але у поняттях потреб визначення по тексту цієї Стратегії не приводяться.

За кількісними показниками запасів нафти з газоконденсатом Україна посідає третє місце в Європі після Великобританії та Норвегії. Однак рівень річного видобутку цих вуглеводнів значно нижчий, ніж у багатьох інших країнах, немає чіткої тенденції до зростання. До причин нижчих показників видобування належать: низький дебет видобувних свердловин; родовища, вироблені чи знаходяться на завершальній стадії розробки; невисокий коефіцієнт вилучення (нафтовіддачі, газовіддачі); морально та фізично застарілий фонд експлуатаційної техніки; великі глибини залягання нафтогазоносних пластів і т.ін.

До факторів, що знижують нафтогазове надрокористування, належать постійне зростання податкового навантаження, в першу чергу, рентних платежів, вкрай недостатнє бюджетне фінансування геологорозвідувальних робіт і висока вартість спеціальних дозволів на користування надрами.

У вугільній промисловості України до проблем належать наступні: потреби розробки проєктів освоєння складних гірничотехнічних умов більшості шахт, оновлення застарілого технічного оснащення шахтного фонду, політичні і т.ін.

Висновки. Сучасну енергетику необхідно розвивати як фундаментальну природничо-історичну науку, що розбудована і розвивається на генетичній основі, за потребами визнання корисних копалин як об'єктів народної власності та реального організаційно-економічного впливу населення старостівських округів на територіальні суб'єкти господарювання щодо проведення ними еколого-інноваційних заходів для збереження довкілля, в першу чергу рослинництва, конкретно через стимулюючий механізм екологічних фіскальних зобов'язань. Якщо енергетичні корисні копалини на законодавчому рівні будуть визнані власністю народу України, тоді йому служитимуть результативно.

Список використаних джерел

1. Національна економічна стратегія на період до 2030 року, затв. постановою Кабінету Міністрів України від 3 березня 2021 р. № 179.

2. Світове споживання енергії.
URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Світове_споживання_енергії (дата звернення 31.03.2025).

References

1. Natsionalna ekonomichna stratehiia na period do 2030 roku, zatv. postanovoiu Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 3 bereznia 2021 No. 179. (Ukr).

2. Svitove spozhyvannia enerhii.
URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Svitove_spozhyvannia_enerhii (accessed 31.03.2025). (Ukr).

Наукове видання

Наукова конференція

**Аспірантські читання імені професора
Артура Веніаміновича Праховника**

до 85-річчя від дня народження

25–26 БЕРЕЗНЯ 2025 РОКУ

Матеріали конференції

*В авторській редакції
Надруковано з оригінал-макета замовника*

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Свідоцтво про державну реєстрацію: серія ДК № 5354 від 25.05.2017 р.
просп. Берестейський, 37, м. Київ, 03056

Підп. до друку 03.07.2025. Формат 60×84^{1/16}. Папір офс. Гарнітура Times.
Спосіб друку – електрографічний. Ум. друк. арк. 13,18. Обл.-вид. арк. 14,94.
Наклад 30 пр. Зам. № 25-047.

Видавництво «Політехніка» КПІ ім. Ігоря Сікорського
вул. Політехнічна, 14, корп. 15
03056, м. Київ
тел. (044) 204-81-78