

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**



XI Міжнародна науково-технічна конференція
ЕНЕРГЕТИЧНИЙ МЕНЕДЖМЕНТ:
стан та перспективи розвитку –
PEMS'2025

ЗБІРНИК МАТЕРІАЛІВ КОНФЕРЕНЦІЇ

ЛИСТОПАД 18-20, 2025
<http://pems.kpi.ua/>

НАУКОВИЙ КОМІТЕТ

РОЗЕН Віктор, проф.

Голова наукового комітету
КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна

БАСОК Борис, член-кор. НАН України

Інститут технічної теплофізики НАН України, Україна

БЕСАРАБ Олександр, доцент

Національний університет «Одеська політехніка»,
Україна

БОНДАРЕНКО Юрій, проф.

Науково-технічна спілка енергетиків та електротехніків
України

БОРИЧЕНКО Олена, доцент

КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна

БОСИЙ Дмитро, проф.

Український державний університет науки і технологій,
Україна

БУРБЕЛО Михайло, проф.

Вінницький національний технічний університет,
Україна

БЯЛОБРЖЕСЬКИЙ Олексій, доцент

Кременчуцький національний університет імені
Михайла Остроградського, Україна

ВОВК Оксана, проф.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна

ГОНСАЛЕС-ЛОНГАТТ Франсіско, проф.

Університет південно-східної Норвегії, Норвегія

ГУБІН Сергій, проф.

Національний аерокосмічний університет
ім. М.Є. Жуковського «ХАІ», Україна

ДЕШКО Валерій, проф.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна

ЖАРКІН Андрій, академік НАН України

Інститут електродинаміки НАН України, Україна

ЗАПОРОЖЕЦЬ Артур, ст. наук. співробітник

Інститут загальної енергетики НАН України

ЗАХАРЧЕНКО Віктор, проф.

Національний авіаційний університет, Україна

КАПЛУН Віктор, проф.

Національний університет біоресурсів і
природокористування України, Україна

КЮРСАК Михайло, проф.

Інститут енергетики АН Молдови, Молдова

КОШЕЛЕНКО Євгеній, доцент

Національний ТУ «Дніпровська політехніка», Україна

КОМАР Вячеслав, проф.

Вінницький національний технічний університет, Україна

КУДРЯ Степан, проф.

Інститут відновлюваної енергетики НАН України, Україна

ЛАЗУРЕНКО Олександр, проф.

НТУ «Харківський політехнічний інститут», Україна

ЛЕЖНЮК Петро, проф.

Вінницький національний технічний університет, Україна

ЛІ Бернт, проф.

Університет південно-східної Норвегії, Норвегія

НАХОДОВ Володимир, проф.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна

ПАПАЙКА Юрій, проф.

Національний ТУ «Дніпровська політехніка», Україна

ПЛЄШКОВ Петро, проф.

Центрально український національний технічний
університет, Україна

ПОПОВ Володимир, проф.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна

СЕГЕДА Михайло, проф.

Національний університет «Львівська політехніка»,
Україна

СІНЧУК Олег, проф.

Криворізький національний університет, Україна

СТРЖЕЛЕЦЬКІ Ришард, проф.

Гданський університет технологій, Польща

ЧЕРНЯВСЬКИЙ Анатолій, доцент

КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна

ШРАМ Олександр, доцент

Національний університет «Запорізька політехніка»
Україна

ЩОКІН Вадим, проф.

Криворізький національний університет, Україна

ЗМІСТ

1. Карпенко А.В. МОНИТОРИНГ РІВНЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ МУНІЦИПАЛЬНИХ ОБ'ЄКТІВ.....	8
2. Філатов В.І. ЩОДО НАПРЯМКУ ВІДНОВЛЕННЯ І ПОДАЛЬШОГО РОЗВИТКУ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ.....	11
3. Білоус І. Ю., Шевченко О.М., Гавриш А.В. ДОСЛІДЖЕННЯ ПИТАНЬ УТЕПЛЕННЯ ІСТОРИЧНИХ БУДІВЕЛЬ.....	13
4. Лещенко П.М., МЕТОДИ КООРДИНОВАНОЇ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ В ЕНЕРГОСИСТЕМАХ ІЗ РОЗПОДІЛЕНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ.....	15
5. Ніцак Я. М., Босак А.В. ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ КОМПРЕСОРНИХ УСТАНОВОК ЗАСОБАМИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ З ЦИФРОВИМ ДВІЙНИКОМ.....	17
6. Калейніков Г.Є. МОДЕЛЬ ІНТЕГРОВАНОЇ ПІДГОТОВКИ ЕНЕРГОМЕНЕДЖЕРІВ.....	20
7. Довгий С.С., Коцар О.В. ОСОБЛИВОСТІ ЕНЕРГЕТИЧНОГО АУДИТУ ПІДПРИЄМСТВ БУДІВЕЛЬНОЇ ГАЛУЗІ В КОНТЕКСТІ ЧИННОГО ЗАКОНОДАВСТВА.....	22
8. Прищепя Я.О., Замулко А.І. МЕТОДИЧНІ ЗАСАДИ ФОРМУВАННЯ АНКЕТИ ДЛЯ ОПИТУВАННЯ З ПИТАНЬ ОЦІНЮВАННЯ БЕЗПЕКИ ПОСТАЧАННЯ.....	25
9. Kostenko G.P., Zaporozhets A.O. ENERGY MANAGEMENT STRATEGIES IN VIRTUAL POWER PLANTS WITH EV FLEET INTEGRATION.....	28
10. Богойко І.І., Замулко А.І. НАУКОВІ ЗАСАДИ ФОРМУВАННЯ КОНЦЕПЦІЇ РОЗВИТКУ ЗАРЯДНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ В УКРАЇНІ.....	30
11. Кавун І.М., Замулко А.І. ВИКОРИСТАННЯ RVM АНАЛІЗУ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ЦИФРОВІЗАЦІЇ В РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ.....	32
12. Босий Д. О., Саблін О. І., Потапчук І. Ю., Антонов А.В., МОНИТОРИНГ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ОБ'ЄКТІВ ТРАНСПОРТУ ТА НАПРЯМИ ПІДВИЩЕННЯ ЇХ РІВНЯ БЕЗПЕКИ І ЗАХИЩЕНОСТІ.....	35
13. Наталіч В.О., Ярмолюк О.С., Попов В.А., ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ SOFT OPEN POINTS (SOP) ПРИ РЕАЛІЗАЦІЇ ДИНАМІЧНОГО КЕРУВАННЯ РЕЖИМАМИ РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖ.....	37
14. Босак А.В. ЕКОНОМІЧНИЙ ОГЛЯД ТА ПОТЕНЦІЙНА РОЛЬ ТЕХНОЛОГІЇ VEHICLE-TO LOAD (V2L) В ЗАБЕЗПЕЧЕННІ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СТІЙКОСТІ УКРАЇНИ.....	40
15. Kostenko G.P. SYSTEM OF KEY PERFORMANCE INDICATORS FOR INTEGRATED EVALUATION OF SECOND-LIFE EV BATTERY DEPLOYMENT IN ENERGY SYSTEMS.....	42
16. Khodakivsky V. ASSESSING THE RESILIENCE OF LOCAL POWER SYSTEMS IN UKRAINE USING A COMBINED HEAT AND POWER APPROACH.....	44

17. Головка О.С., Ковтун С.І. ОБҐРУНТУВАННЯ УДОСКОНАЛЕНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ РЕГУЛЮВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯ.....	46
18. Могилат М.Ю., Ткаченко В.В., Яценко Д.В. ОПТИМІЗАЦІЯ РОБОТИ ГІБРИДНОЇ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ ДЛЯ ПРИВАТНОГО БУДИНКУ У ПРОГРАМНОМУ СЕРЕДОВИЩІ PVSYST.....	49
19. Черкашин М. Нечаєва Т.П, СИСТЕМИ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ (BESS) ЯК ІНСТРУМЕНТ ОПТИМІЗАЦІЇ РЕЖИМІВ РОБОТИ МЕРЕЖІ 0,4 кВ.....	51
20. Trachuk A.R., Polyachenko I.O. Shevchenko A.P. SYSTEMS ANALYSIS TOOLS AND THEIR APPLICATION IN THE FIELD OF RENEWABLE ENERGY.....	56
21. Некрасов А.В., Калінчик В.П. КЕРУВАННЯ ПОПИТОМ НА ЕЛЕКТРИЧНУ ЕНЕРГІЮ ШЛЯХОМ ІНТЕГРАЦІЇ АВТОМАТИЧНИХ ВИМИКАЧІВ 0,4 КВ В СИСТЕМУ АСКОЕ.....	58
22. Козловський Є.В., Волошк А.В., ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ДЖЕРЕЛА ПРОВАЛУ НАПРУГИ.....	60
23. Євсєєв Є.В., Черкашина Г.І. ОСОБЛИВОСТІ РОЗРОБЛЕННЯ ПРОЄКТНОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ СЕС АКТИВНИХ СПОЖИВАЧІВ: ВІД СТАТУСУ ДО СКЛАДУ ПД.....	64
24. Мірошніченко А.М., Сулим М. Ю., Петрова К.Г. РЕГІОНАЛЬНІ ЕНЕРГЕТИЧНІ КОМПЛЕКСИ УКРАЇНИ: ІНТЕГРАЛЬНА ОЦІНКА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ДЛЯ СТАЛОГО РОЗВИТКУ.....	67
25. Тимофєєва К.О., Петрова К.Г., ІНТЕЛЕКТУАЛЬНЕ ПРОГНОЗУВАННЯ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ ПРОМИСЛОВИХ ОБ'ЄКТІВ З УРАХУВАННЯМ ЗОВНІШНІХ ФАКТОРІВ ВПЛИВУ.....	69
26. Моргунов А.Д., Петрова К.Г., ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ПРОМИСЛОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ НА ОСНОВІ ГІБРИДНИХ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ.....	71
27. Дорошкевич В.О., Шовкалюк М.М., АНАЛІЗ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ ЩОДО ОГОРОДЖЕНЬ ТА ІНЖЕНЕРНИХ СИСТЕМ АДМІНІСТРАТИВОЇ БУДІВЛІ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИМОГ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЗГІДНО ДІЮЧИХ НОРМ.....	73
28. Топало О.В., Веремійчук Ю.А., АНАЛІЗ СУТТЄВИХ СПОЖИВАЧІВ ЕНЕРГІЇ СПОРТИВНИХ СПОРУД.....	76
29. Бориченко О.В., Євдокімова А.В., БАР'ЄРИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ПОПИТОМ В УКРАЇНИ.....	78
30. Замулко А.І., Бердник О.М., МАЛА ВІТРОГЕНЕРАЦІЯ З УРАХУВАННЯМ ВИМОГ СТАНДАРТУ NZEB.....	81
31. Шаповалов О.О., Притискач І.В., ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ГІБРИДНИХ СИСТЕМ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗА РАХУНОК ЗАСТОСУВАННЯ УСТАНОВОК ЗБЕРІГАННЯ ЕНЕРГІЇ.....	83
32. Коробцов І. А. АВТОМАТИЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯМ У ГІБРИДНІЙ ЕНЕРГЕТИЧНІЙ УСТАНОВЦІ НА ОСНОВІ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ.....	86

33. <i>Бориченко О.В., Чечун І.О. ФОРМУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ПОРТФЕЛЯ УКРАЇНИ НА ОСНОВІ ІМПОРТНО-ЕКСПОРТНИХ ОПЕРАЦІЙ У КОНТЕКСТІ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ.....</i>	<i>88</i>
34. <i>Бориченко О.В., Філіппова О.М. ДОВГОСТРОКОВІ ДВОСТОРОННІ КОНТРАКТИ ЯК ІНСТРУМЕНТ ПІДВИЩЕННЯ СТАБІЛЬНОСТІ ТА ПРОГНОЗОВАНOSTІ РИНКУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ УКРАЇНИ В КРИЗОВИХ УМОВАХ.....</i>	<i>90</i>
35. <i>Сіваченко Х.В., Бориченко О.В. ПІДХОДИ ДО ВИЗНАЧЕННЯ БАЗОВОГО РІВНЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ НА ПРОМИСЛОВИХ ОБ'ЄКТАХ.....</i>	<i>92</i>
36. <i>Ярошук С.О., Бориченко О.В. РОЛЬ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ ЕНЕРГОМОНІТОРИНГУ В ЕНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТІ МУНІЦИПАЛЬНИХ БУДІВЕЛЬ.....</i>	<i>95</i>
37. <i>Чернявський А.В., Потник Д. А, ІНТЕГРАЦІЯ СИСТЕМ ЕНЕРГОМОНІТОРИНГУ В МУНІЦИПАЛЬНУ ІНФРАСТРУКТУРУ ЖИТЛОВИХ РАЙОНІВ.....</i>	<i>98</i>
38. <i>Бориченко О.В., Телевний Д.О. ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ РІШЕННЯ ДЛЯ ТЕХНОЛОГІЙ ОБСМАЖЕННЯ КАВИ НА ПІДПРИЄМСТВІ ХАРЧОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ.....</i>	<i>100</i>
39. <i>Чернявський А.В., Рак М. П. ДОЦІЛЬНІСТЬ СТВОРЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО КООПЕРАТИВУ У ВІЙСЬКОВИЙ ЧАС В УКРАЇНІ.....</i>	<i>102</i>
40. <i>Гапєєв С.М., Старушенко Г.А. ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОЇ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ВОЛОКНИСТОГО КОМПОЗИТУ ЗА ТРИФАЗНОЮ МОДЕЛЛЮ.....</i>	<i>104</i>
41. <i>Данішевський А.С. КОЕФІЦІЄНТ ДЕГРАДАЦІЇ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ФАСАДІВ БУДІВЕЛЬ.....</i>	<i>106</i>
42. <i>Новиков А. О., Сліденко В. М. АНАЛІЗ ЕЛЕКТРИЧНИХ СХЕМ ПІДКЛЮЧЕННЯ ДЛЯ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ.....</i>	<i>108</i>
43. <i>Ващишак І.Р. ЗАСТОСУВАННЯ ПУЛЬСАЦІЙНИХ ТЕПЛОВИХ ТРУБОК ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ВІКОН.....</i>	<i>110</i>
44. <i>Жевжик О.В., Босий Д. О., Потапчук І.Ю. ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЗАКРУЧЕНОГО ПОТОКУ У ОБЕРТОВИХ ПЕЧАХ ДЛЯ СПАЛЮВАННЯ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ.....</i>	<i>112</i>
45. <i>Оболонін О.С. ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ АЛГОРИТМИ ТА BIG DATA ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ СПІЛЬНОГО ДИСПЕТЧЕРСЬОГО УПРАВЛІННЯ СИСТЕМАМИ.....</i>	<i>114</i>
46. <i>Безкоровайний В.В., Ганжа А.М. АНАЛІЗ ВАРІАНТІВ РЕКОНСТРУКЦІЇ РЕГЕНЕРАТИВНИХ ПОВІТРОНАГРІВАЧІВ МЕТАЛУРГІЙНОГО ВИРОБНИЦТВА НА ОСНОВІ CFD МОДЕЛЮВАННЯ.....</i>	<i>116</i>
47. <i>Нерубацький В.П., ОГЛЯД ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ БЕЗКОЛЕКТОРНИХ ТЯГОВИХ ДВИГУНІВ ЛОКОМОТИВІВ.....</i>	<i>118</i>
48. <i>Федірко М.М. СТРУКТУРА ТА ПОТЕНЦІАЛ ГІБРИДНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ОБ'ЄКТІВ КОМУНАЛЬНОЇ ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКИ.....</i>	<i>120</i>

49.	<i>Бєлоха Г. С., Музика В.О. ОСОБЛИВОСТІ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ЛОКАЛЬНОЇ МЕРЕЖИ З КОМПЕНСАТОРОМ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ.....</i>	<i>121</i>
50.	<i>Bilovol H. FORMATION OF AN INDUSTRIAL HEAT SUPPLY DECARBONIZATION STRATEGY USING A MODEL FOR IMPROVING THE SUSTAINABILITY OF PRODUCTION SYSTEMS.....</i>	<i>124</i>
51.	<i>Зайченко С. В., Гомзік Б. М. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГОСИЛОВИХ ПАРАМЕТРІВ ГІДРАВЛІЧНОГО ПРИВОДУ ТЮБІНГУКЛАДАЧА.....</i>	<i>126</i>
52.	<i>Носаль О.Ю Носаль В.Ю. ІНТЕГРАЦІЯ МЕТОДІВ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ ВДОСКОНАЛЕННЯ ЧИСЕЛЬНО-АНАЛІТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ РОЗРАХУНКУ ВЛАСНИХ ЧАСТОТ КОЛИВАНЬ КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПАРОВИХ ТУРБІН.....</i>	<i>130</i>
53.	<i>Бойченко С.В., Яворський Б.Ю. ІНТЕГРАЦІЯ ФОТОВОЛЬТАІЧНИХ ПАНЕЛЕЙ ТА СИСТЕМ ГЕНЕРУВАННЯ ВОДНЮ В АВТОМАТИЗОВАНИХ АУТОНОМНИХ СИСТЕМАХ ГЕНЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРИКИ</i>	<i>132</i>
54.	<i>Гоголь В.В., Калінчик В.П. РОЗБУДОВА ТА РЕКОНСТРУКЦІЯ РОЗПОДІЛЬНОЇ ТА НИЗЬКОВОЛЬТНОЇ МЕРЕЖІ У КИЇВСЬКІЙ ОБЛАСТІ.....</i>	<i>135</i>
55.	<i>Жигульський М.С., Замулко А.І. ОГЛЯД РОЗРОБКИ ТА ТЕСТУВАННЯ ЦИФРОВИХ РІШЕНЬ ДЛЯ МІСЬКИХ РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ</i>	<i>137</i>
56.	<i>Поліщук Н.О., Коцар О.В. РЕЗЕРВУВАННЯ СИСТЕМ КОМБІНОВАНОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЖИТЛОВИХ КОМПЛЕКСІВ РЕСУРСОМ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ</i>	<i>140</i>
57.	<i>Цих В. С., Яворський А. В., Кульчак А. М. ОСОБЛИВОСТІ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ДВОСТОРОННІХ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ</i>	<i>143</i>
58.	<i>Бєлоха Г, Васюрин Б., БЛОКЧЕЙН ЯК АВТЕНТИФІКАЦІЯ ЗЕЛЕНОЇ ЕНЕРГІЇ....</i>	<i>145</i>
59.	<i>Полховський І. П., Маланчук Є. З., Стець С. Є., ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ЧАСТОТНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЗМІННОГО СТРУМУ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ.....</i>	<i>147</i>
60.	<i>Василець Д.С. ОПТИМІЗАЦІЯ СОНЯЧНОЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ. ПРИНЦИП РОБОТИ ОПТИМІЗАТОРА НАПРУГИ.</i>	<i>151</i>
61.	<i>Браславський С. С., Бєлоха Г.С. ШЛЯХИ МОДЕРНІЗАЦІЇ ТРАНСФОРМАТОРНИХ ПІДСТАНЦІЙ В УМОВАХ ІНТЕГРАЦІЇ ВДЕ.....</i>	<i>153</i>
62.	<i>Данілін О.В., Ісаєв М.С. РОЗРОБЛЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ “РОЗУМНИЙ БУДИНОК” З ІНТЕГРАЦІЄЮ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ ДЛЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО КЕРУВАННЯ ПОБУТОВИМИ ПРОЦЕСАМИ.....</i>	<i>154</i>
63.	<i>Волчок В.О., Булгару І.М. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТУ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ СИПКОГО ПАЛИВА</i>	<i>157</i>
64.	<i>Косой Б. В., Гайдук С. В. ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТРИГЕНЕРАЦІЙНИХ СИСТЕМ З КОМПРЕСОРНИМИ ТЕПЛОВИКОРИСТАЛЬНИМИ ХОЛОДИЛЬНИМИ МАШИНАМИ</i>	<i>159</i>

65. Зайченко С. В., Чернега К.В. СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ТА ДІАГНОСТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ	161
66. Лободзинський В.Ю., Бурик М.П., Паламарчук А.О. ЗАСТОСУВАННЯ МАШИННОГО НАВЧАННЯ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ПОПИТУ НА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЮ В SMART GRIDS.....	165
67. Галко В., Волошко А.В. СТРИБКИ ФАЗОВОГО КУТА В ЕЛЕКТРИЧНІЙ МЕРЕЖІ.....	168
68. Райченко А.Є., Ярмолюк О.С. ЦИФРОВІ МЕТОДИ МОНІТОРИНГУ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ НАДІЙНОСТІ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ КОМУНАЛЬНО-ПОБУТОВИХ ОБ'ЄКТІВ НА ОСНОВІ АЛГОРИТМУ RANDOM FOREST.....	171

МОНІТОРИНГ РІВНЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ МУНІЦИПАЛЬНИХ ОБ'ЄКТІВ

Вступ. Сучасні виклики, зумовлені змінами клімату та загрозами енергетичній стабільності, формують потребу в ефективному управлінні енергоресурсами. Для України питання енергоефективності має стратегічне значення як у контексті європейської інтеграції, так і для забезпечення сталого розвитку територіальних громад, зокрема, в умовах воєнного стану. Згідно з Енергетичною стратегією України до 2050 року пріоритетними напрямками є модернізація енергетичної інфраструктури, скорочення енерговитрат та впровадження систем енергетичного менеджменту (СЕНМ). Значну частку в структурі споживання енергоресурсів на муніципальному рівні складають заклади освіти, охорони здоров'я та адміністративні будівлі. На цих об'єктах існує потреба у визначенні базових рівнів енергетичної ефективності як для окремих об'єктів, так і для їхніх груп з метою подальшого моніторингу та контролю продуктивності реалізованих енергоефективних заходів. Проте, якщо для окремих будівель у нормативному полі України існує чітка Методика визначення базового рівня енергетичної ефективності [1], то для групових (агрегованих) об'єктів підходи не визначено. Потреба в їх розробці зумовлена необхідністю забезпечення належного функціонування СЕНМ на рівні територіальних громад, що охоплює систематичний енергомоніторинг, порівняльний аналіз рівнів енергоспоживання однотипних об'єктів, виявлення відхилень у споживанні енергоресурсів та оцінку ефективності впроваджених заходів. Агреговані базові рівні може бути використано як орієнтири для планування заходів з енергозбереження, формування цільових показників енергоефективності та оптимізації витрат на утримання муніципальної інфраструктури. Виникає потреба у розробці ефективного підходу до реалізації порівняльного аналізу та енергомоніторингу групи муніципальних закладів єдиного призначення у межах територіальної громади.

Метою досліджень є розробка та обґрунтування методологічного підходу до визначення агрегованого базового рівня енергетичної ефективності для груп муніципальних будівель на прикладі закладів дошкільної освіти (ЗДО), з урахуванням вимог чинної нормативно-правової бази України та міжнародних стандартів у сфері енергетичного менеджменту.

Матеріал і результати дослідження. Методика [1] встановлює порядок визначення базового рівня енергетичної ефективності шляхом аналізу споживання енергоресурсів за останні три роки з урахуванням кліматичних умов градусо-діб опалення, питомих показників тощо. Методика [1] передбачає застосування до індивідуальних будівель, але не описує підходів до агрегування результатів на групу. У міжнародних стандартах ДСТУ ISO 50001 «Системи енергетичного менеджменту» [2] та ДСТУ ISO 50006 «Вимірювання енергетичних показників» визначено принципи формування базових ліній (EnB) та енергетичних індикаторів (EnPI) [3]. Зазначені стандарти допускають застосування базових рівнів як для окремих будівель, так і для групових об'єктів, з можливістю агрегування та нормалізації даних. Таким чином, міжнародна практика дає підґрунтя для розробки адаптованих рішень в Україні.

Результати розрахунку базового рівня енергетичної ефективності під час споживання теплової та електричної енергії на прикладі п'яти закладів ЗДО м. Запоріжжя на основі даних за три минулих роки наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Розрахунок базового рівня енергетичної ефективності для групи ЗДО м. Запоріжжя

Заклад	Теплова енергія, Гкал	Електроенергія, кВт·год	Теплова енергія, МВт·год	Електроенергія, МВт·год	Базовий рівень, МВт·год/рік
ЗДО «А»	45,76	15000,61	53,16	15,00	68,16
ЗДО «Б»	225,45	46881	261,97	46,88	308,85
ЗДО «В»	269,86	52112,88	313,48	52,11	365,59
ЗДО «Г»	147,46	44829,22	171,37	44,83	216,20
ЗДО «Д»	319,56	40222,75	371,33	40,22	411,55
Разом:	1008,09	199046,46	1171,31	199,04	1370,35

Показники відображають середньорічне енергоспоживання у МВт·год/рік і слугують відправною точкою для подальшого моніторингу та аналізу енергетичної ефективності ЗДО. Визначення базового рівня дає змогу об'єктивно оцінювати зміни у споживанні енергії, враховуючи сезонні коливання та вплив впроваджених заходів з енергоефективності для оцінки енергоспоживання не лише окремих об'єктів, а й усієї групи закладів. Такий підхід забезпечує можливість моніторингу на рівні територіальної громади, порівняння ефективності реалізованих заходів у різних групах об'єктів та формування енергетичної політики на основі узагальнених даних побудовано графік на рис 1, який ілюструє базові рівні енергетичної ефективності кожного ЗДО та їхнє середнє значення.

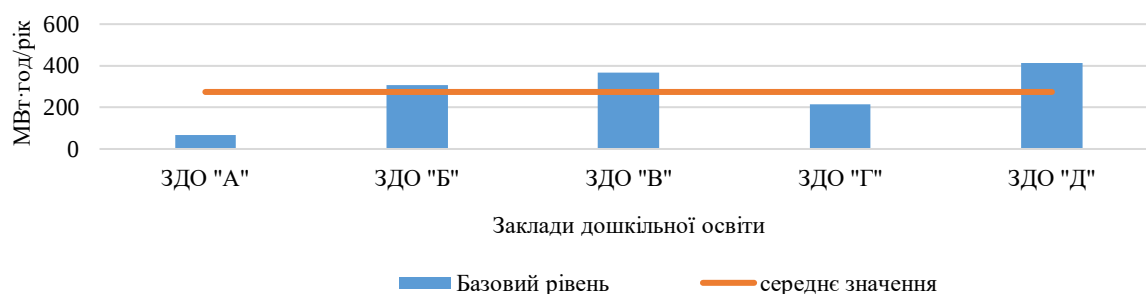


Рисунок 1. Середнє арифметичне значення енергоспоживання групи ЗДО

Розглянемо фактичні дані теплової та електричної енергії за 2022–2024 роки по кожному закладу та проведемо їх порівняння з розрахованим базовим рівнем, що дасть змогу проаналізувати динаміку енергоспоживання (рис. 2).

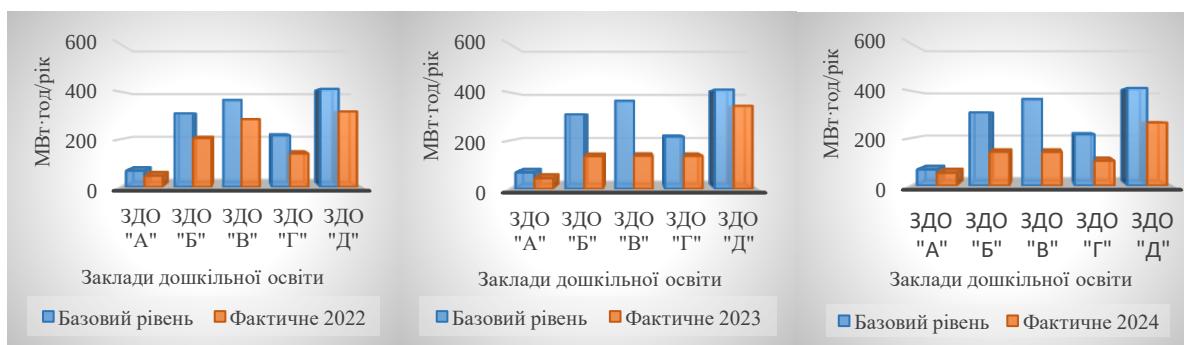


Рисунок 2. Динаміка змін енергоспоживання ЗДО відносно базового рівня (2022–2024 рр.)

Аналіз отриманих результатів показує стійку тенденцію до зниження енергоспоживання у всіх закладах: ЗДО «А» демонструє економію 37–46 % із незначним зростанням у 2024 році, ЗДО «Б» — найкращу динаміку скорочення до 60 %, ЗДО «В» — найвищу економію понад 67 %, ЗДО «Г» стабільно знижує споживання в межах 45–55 %, а ЗДО «Д», маючи найбільшу площу, поступово покращує показники від 26 до 38 %. Економія у всіх ЗДО може бути результатом комплексу заходів, серед яких проведення капітального ремонту будівель, оновлення та модернізація теплопунктів, встановлення більш енергоефективного обладнання, а також оптимізація режимів роботи закладів.

Подальший аналіз допоможе виокремити основні чинники, що вплинули на зміну енергоспоживання, та розробити ефективні рекомендації для підвищення енергоефективності на муніципальному рівні з урахуванням поточних соціально-економічних умов.

Висновки: Розрахунок базового рівня для п'яти ЗДО м. Запоріжжя показав, що середньорічне споживання енергії коливається в межах 68–412 МВт·год/рік. Базовий рівень енергетичної ефективності для групи об'єктів склав 1370,35 МВт·год/рік.

Порівняння фактичного споживання енергоресурсів за 2022–2024 роки з розрахованим базовим рівнем продемонструвало зниження енергоспоживання у більшості ЗДО на 26–67 % що свідчить про позитивний вплив енергоефективних заходів, модернізації обладнання та оптимізації режимів роботи закладів.

Запропонований підхід дозволяє оцінювати ефективність енергоспоживання окремих об'єктів та формувати показники для групи будівель, що є важливим інструментом для СЕнМ на рівні територіальних громад, планування заходів з енергозбереження.

Визначення агрегованого базового рівня енергоспоживання дасть змогу оцінювати ефективність використання енергоресурсів не лише окремих будівель, а й усієї групи об'єктів у межах муніципалітету, саме такий підхід може бути використаний для формування типових показників енергоефективності, планування фінансування енергоефективних заходів та оцінки досягнення цілей енергетичної політики на муніципальному рівні. Створить основу для більш системного управління енергоспоживанням і прийняття обґрунтованих управлінських рішень.

Список використаних джерел:

1. Методика визначення базового рівня енергетичної ефективності. Наказ Міністерства розвитку громад, територій та інфраструктури України від 14 грудня 2023 року № 1140. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0192-24#Text> (дата звернення 29.09.2025).
2. ДСТУ ISO 50001:2022 Системи енергетичного менеджменту. Вимоги та настанова щодо використання. (дата звернення 20.10.2025).
3. ДСТУ ISO 50006:2023 Системи енергетичного менеджменту. Вимірювання рівня досягнутої/досяжної енергоефективності з використанням базових рівнів енергоспоживання та показників енергоефективності. (дата звернення 21.10.2025).

ЩОДО НАПРЯМКУ ВІДНОВЛЕННЯ І ПОДАЛЬШОГО РОЗВИТКУ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

В склад об'єднаної енергосистеми входять електрогенеруючі установки, які призначені для покриття базової, напівпікової та пікової частини графіку електроспоживання. Оптимальний розподіл питомих часток потужності між цими установками є критерієм збалансованості генеруючої частини енергосистеми.

При виборі генеруючих установок, що покривають базове навантаження, обов'язково враховуються їх техніко-економічні показники – оптимальний рівень потужності, коефіцієнт корисної дії та типу і вартості палива. Для установок, що покриваються пікову і напівпікову частину графіка обов'язково враховують маневрові характеристики - швидкість пуску та досягненні номінальної потужності та швидкість зміни потужності.

У відповідності до виконаного у 2020 році аналізу [1,2], в об'єднаній енергосистемі України склався наступний розподіл генеруючої потужності: АЕС - 25,5%, ТЕС і потужних ТЕЦ – 44,1%, ГЕС та ГАЕС – 11,5 % та СЕС і ВЕС – 11,6%. АЕС несли базове навантаження, ТЕС і ТЕЦ несли базове навантаження та приймали участь у напівпіковій частині графіка, ГЕС і ГАЕС використовувались в якості пікової потужності, а СЕС і ВЕС (особливо СЕС) мали дестабілізуючий вплив на частоту енергосистеми і потребували додаткової компенсуючої пікової потужності. Дефіцит маневрової генеруючої потужності в енергосистемі у відповідності до [3] становив 3,0-4,0 ГВт.

Теплові електричні станції України мали наступну структуру. Із 90 енергоблоків, що спалюють тверде паливо 50 мали встановлену потужність 100, 150 і 200 МВт і 40 мали встановлену потужність 300 МВт. Перша група введена в експлуатацію в 60-х, а друга - в 70-х роках минулого століття. Відповідно всі вони перевищили проектний ресурс і напруження основного обладнання практично у всіх цих ТЕС перевищила 250 тисяч годин. За останні 15 років тільки 19 енергоблоків ТЕС пройшли комплексну модернізацію, завданнями якої було підвищення електричної потужності, надійності і економічності. 60 відсотків ТЕЦ, що знаходяться в експлуатації введені в експлуатацію в 60 роках і мають низькі і техніко-економічні показники визначені об'єктивними факторами.

Аналіз добового споживання електроенергії показав, що енергоблоки ТЕС використовувались при регулювання частоти в енергосистемі в якості напівпікової потужності. В той самий час енергоблоки ТЕС, особливо енергоблоки потужністю 300 МВт що працюють на твердому паливі і мають рідке шлаковидалення, призначені для роботи на базових навантаженнях. Вони не можуть розвантажуватися нижче 220 МВт. Швидкість прийняття та скидання навантаження у цих низька і не дозволяє достатньо швидко ліквідувати піки або провали навантаження, що виникають в енергосистемі. Робота в режимі гарячого резерву значно знижує їх економічність за рахунок підвищення витрат палива і прискорює спрацьовування залишкового ресурсу турбінної установки.

В даний час, в результаті цілеспрямованих ударів агресорів по енергетичній галузі сильно пошкоджено чи зруйновано біля 80% всіх енергоблоків ТЕС, зруйнована

Каховська та виведені з експлуатації інші потужні ГЕС. Базову частину графіка споживання забезпечують АЕС, а регулюючу функцію виконують малопотужні когенераційні установки.

Після перемоги і завершення військових дій об'єднана енергетична система України в частині генеруючої потужності потребує відновлення і модернізації. АЕС будуть нести базове навантаження, ГЕС і ГАЕС після відновлення обладнання і далі будуть

використовуватись в якості пікової потужності. Найбільш значну модернізацію повинні пройти теплоенергетичні установки, що в якості джерела використовують енергію спалювання органічного палива.

Для використання в базовій частині графіка споживання з частковим покриттям напівпікової його частині оптимально використати потужні парогазові установки, які включають в свій склад газову і парову турбіну і котел утилізатор. Ці установки в порівнянні з діючими енергоблоками ТЕС мають наступні характеристики: потужність одного енергоблоку - від 100 до 600 МВт; КВВП 56-60% (36% для енергоблоку ТЕС з СКП), питомі витрати на будівництво ~ 1500 – 1800 \$/кВт (2500-3000\$/кВт для ТЕС). В той самий час на відміну від енергоблоків ТЕС ПГУ мають значно кращі маневрові характеристики: 15 хвилин до набору 20% потужності і 45 хвилин до виходу на номінальну потужність. Перевагою ПГУ на твердопаливними ТЕС також є те, що при їх роботі відсутні викиди в атмосферу пилових частинок і оксидів сірки.

ПГУ також можливо використовувати в комплексі з установками газифікації бурого вугілля і торфу. Це призведе до зниження КВВП (до ~45%) і збільшення питомих витрат на будівництво, та дозволить використовувати дешеве паливо.

Зазначені установки оптимально використати також при заміні обладнання ТЕЦ, яке також було знищено чи відпрацьовало свої ресурсні характеристики: ПГУ великої потужності з теплофікаційними турбінами замість ТЕЦ великої і середньої потужності (наприклад Харківська ТЕЦ-5 та Кременчуцька ТЕЦ). Замість ТЕЦ малої потужності можуть бути встановлені когенераційні установи середньої та малої потужності на базі газових турбін чи газо поршневих двигунів [5]. Маневрові характеристики цих установок дозволяють використовувати їх в якості пікових установок під час неопалювального сезону.

Список використаних джерел:

1 Встановлена потужність енергосистеми України на 11/2020. Сайт НЕК Укренерго. <https://ua.energy/vstanovlena-potuzhnist-energosityemy-ukrayiny>.

2 Філатов В.І. Структура та характеристики генеруючих потужностей і їх сумісний вплив на загальну собівартість електроенергії і роботу енергосистеми України// Электрические сети и системы. - 2020.- №5-6. - С. 17-21.

3 Ленчевський Є.А., Годун О.В. Можливість прискорення інтеграції ОЕС України до ENTSO-E за умови реалізації процесів передачі маневрових генеруючих потужностей на магістральних лініях АЕС// Электрические сети и системы. - 2020.- №5-6. - С. 8-16.

4 Добовий графік виробництва/споживання електроенергії . Сайт НЕК Укренерго. <https://ua.energy/peredacha-i-dyspetcheryzatsiya/dyspetcherska-informatsiya/dobovyy-grafik-vyrobnystva-spozhyvannya-e-e>.

5 Філатов В.І., Голенко І.І. Використання теплоенергоцентралей в якості пікових та напівпікових потужностей// International Scientific Journal Grail of Science.-2022.-№12-13.-С.288-293.

ДОСЛІДЖЕННЯ ПИТАНЬ УТЕПЛЕННЯ ІСТОРИЧНИХ БУДІВЕЛЬ

Мета роботи. Обґрунтування застосування внутрішнього утеплення із використанням конопляного утеплювача для термомодернізації історичних будівель та проведення порівняльного аналізу його теплотехнічних характеристик з традиційними утеплювачами.

Вступ. Адаптація будівель до стандартів NZEB (з близьким до нульового споживанням енергії) є пріоритетом. Для історичних об'єктів це складно через охоронний статус, що забороняє зовнішнє втручання. Внутрішнє утеплення є одним із небагатьох шляхів, але вимагає детальних досліджень на паропроникність та ризики вологонакопичення [1].

Матеріали і результати дослідження. Об'єктом дослідження обрано 6-й корпус КПП ім. Ігоря Сікорського, яка знаходиться в м.Київ та була побудована 1898 р.

Огороджувальні конструкції будівлі мають низький рівень теплозахисту і не відповідають нормативним вимогам ДБН В.2.6-31:2021 [2].

Оскільки історичний статус виключає зовнішнє утеплення, вибір матеріалу для внутрішнього утеплення є критичним через ризик утворення цвілі та конденсації вологи [3]. У цьому контексті розглядаються біосумісні матеріали, як-от конопляний утеплювач. Його переваги: висока паропроникність, екологічність та негативний вуглецевий слід [4].

Для обґрунтування вибору було проведено порівняльний розрахунок теплотехнічних та вологісних характеристик. Розрахунки виконано на платформі CAD E.E. PRO [5] відповідно до ДСТУ 9191:2022 [6] та ДБН В.2.6-31:2021 [2] для кліматичних умов м. Києва. Аналіз проведено для січня, оскільки це найхолодніший місяць з найвищим ризиком утворення конденсату. Результати розрахунків зведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Порівняльні характеристики сценаріїв утеплення

Показник	Сценарій 1	Сценарій 2	Сценарій 3
Теплопровідність, λ , Вт/(м·К)	0,81	0,05	0,048
Коефіцієнт паропроникності, δ , мг/(м·год·Па)	0,11	0,38	0,35
Приведений опір теплопередачі, R_q , м ² ·К/Вт	0,797	3,797	3,922
Результат перевірки на накопичення вологи	Конденсація відсутня	Не виконується	Виконується
Приріст вологості утеплювача за холодний період, ΔW_1 , %	—	4,67	2,94
Допустимий приріст вологості, ΔW_d , %	—	2,5	7,0

Аналіз результатів. Існуючий стан (Сценарій 1): Стіна не відповідає сучасним вимогам до теплового захисту $R = 0,797$ м²·К/Вт.. Варто зазначити, що у конструкції не відбувається накопичення вологи протягом року.

Утеплення мінеральною ватою (Сценарій 2): Дозволяє досягти термічного опору стіни $R = 3,797$ м²·К/Вт. Розрахунок тепловологісного стану показує критичну проблему: в товщі утеплювача відбувається конденсація водяної пари (Рис. 1а). Розрахунковий приріст вологості 4,67% майже вдвічі перевищує допустиму норму для мінеральної вати у 2,5% [2]. Це свідчить про те, що дане рішення є неприйнятним.

Утеплення конопляним утеплювачем (Сценарій 3): Досягається $R=3,922$ м²·К/Вт. (Рис. 1 б). Приріст вологості 2,94% значно нижчий за допустиму межу 7,0% [2]. Умови вологозахисту виконуються.

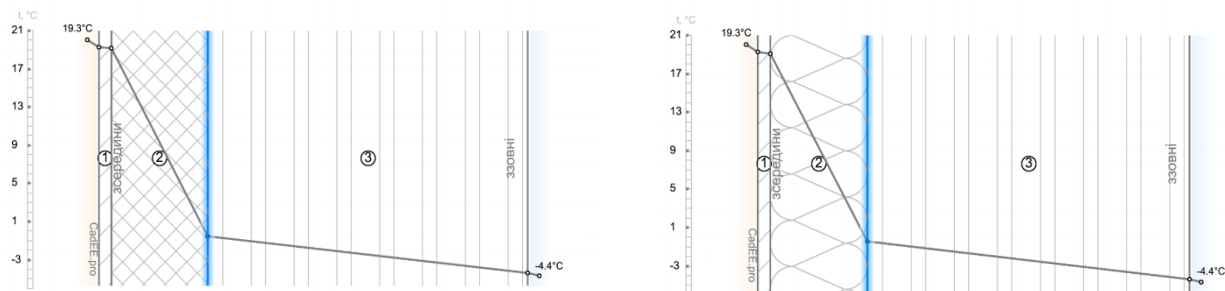


Рисунок 1 – Розподіл температур у товщині огорожуючої конструкції (січень). а) для мінеральної вати
б) для конопляного утеплювача.

Висновок. В роботі проведено дослідження на паропроникність зовнішніх огорожувальних конструкцій історичної будівлі університету КПІ ім.Ігоря Сікорського. Модельні дослідження проведені з використанням платформи CAD E.E. PRO [5], розрахунок проведений для варіанту існуючих огорожень та утеплення з середини класичним утеплювачем на основі мінеральної вати та альтернативним утеплювачем на основі конопляної кастри та вапняної суміші, що дозволяє забезпечити від’ємний вуглецевий слід. Результати дослідження показують ефективність використання для внутрішнього утеплення конопляного утеплювача.

Список використаних літератури

1. Білоус І. Ю., Гетманчук Г. О., Крамаренко С. О., Гавриш А. В. Будівлі з близьким до нульового споживанням енергії в сучасних та історичних будівлях: виклики та рішення // Холодильна техніка та технологія. – 2025. – 61(2). – С. 160-177.
2. ДБН В.2.6-31:2021. Теплова ізоляція та енергоефективність будівель. На заміну ДБН В.2.6-31:2016 ; чинний від 2022-01-31. Вид. офіц. Київ : Укрархбудінформ, 2022. 23 с.
3. Directive (EU) 2024/1275 of the European Parliament and of the Council of 24 April 2024 on the energy performance of buildings (recast). Official Journal of the European Union, L/2024/1275. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2024/1275/oj>
4. Hempire UA: екологічне будівництво з конопель. URL: <https://www.hempire.com.ua/>
5. Онлайн-платформа для теплотехнічних розрахунків CAD E.E. PRO. URL: <https://cadee.pro/>
6. ДСТУ 9191:2022. Теплоізоляція будівель. Метод вибору теплоізоляційного матеріалу для утеплення будівель. На заміну [ДСТУ Б В.2.6-189:2013](#); чинний від 2023-03-01. Вид. офіц. Київ, 2022. 63 с.

МЕТОДИ КООРДИНОВАНОЇ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ В ЕНЕРГОСИСТЕМАХ ІЗ РОЗПОДІЛЕНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ

Вступ. Трансформація енергетичного сектору, зумовлена масовим впровадженням розподілених джерел енергії (РДЕ), вимагає нових підходів до керування розподільчими мережами. Традиційні централізовані методи оптимального потокорозподілу стають неефективними через необхідність обробки величезних масивів даних в реальному часі, проблеми з приватністю просьюмерів та затримки в каналах передачі даних. Можливим рішенням є координована децентралізована оптимізація потоків потужності (КДОПП), ідея якої полягає в розподіленні обчислювального навантаження між локальними агентами (контролерами РДЕ), глобальна узгодженість яких досягається за допомогою агрегатора (координатора). Таким чином, КДОПП є математичним ядром мультиагентного управління і забезпечує досягнення глобальних цілей системи.

Постановка задачі. Задача КДОПП полягає у мінімізації сумарних втрат або витрат на генерацію за умов збереження електричних обмежень та балансу потужності шляхом координації дій незалежних агентів РДЕ.

Математично КДОПП формулюється як задача динамічної оптимізації, що включає:

- Цільову функцію: Сума локальних цілей РДЕ та глобальних цілей агрегатора/координатора.
- Локальні обмеження: Технічні межі роботи інверторів, батарей тощо.
- Мережеві обмеження: Рівняння потокорозподілу, обмеження напруги та струму в лініях.

Ключова вимога "реального часу" означає, що алгоритми повинні знаходити рішення за секунди або долі секунди, що робить традиційні централізовані підходи (які вимагають збору всіх даних в одному центрі) непридатними через затримки зв'язку та складність обчислень.

Існує кілька ключових підходів до реалізації КДОПП, кожен з яких має свої особливості щодо швидкодії, вимог до комунікації та збіжності.

Прямо-двоїстий градієнтний метод (Primal-Dual Gradient Method)[1]. Цей метод є одним з найефективніших для застосувань у реальному часі. Він базується на одночасному оновленні "прямих" змінних (уставки потужності РДЕ) та "двоїстих" змінних (множники Лагранжа, що відповідають за виконання мережевих обмежень, наприклад, напруги).

Сучасні реалізації використовують вимірювання з мережі в реальному часі для оновлення градієнтів, що дозволяє компенсувати неточності моделей мережі.

Для забезпечення стабільності в умовах швидких змін (наприклад, генерації сонячних електростанцій) використовуються алгоритми автоматичного налаштування кроку оптимізації, які адаптуються до поточних умов мережі.

Метод змінних напрямків множників Лагранжа (Alternating Direction Method of Multipliers)[2]. Це класичний метод декомпозиції для розв'язання великих задач оптимізації.

Мережа розбивається на підсистеми. Кожен локальний агент розв'язує свою задачу оптимізації, а потім обмінюється інформацією з сусідніми агентами для досягнення консенсусу щодо спільних змінних на межах зон.

Такий метод добре підходить для збереження приватності даних, але може потребувати значної кількості ітерацій для збіжності, що обмежує його використання в надшвидких процесах.

Метод проксимальної атомарної координації (Proximal Atomic Coordination algorithm)[3]. Цей метод використовує проксимальні оператори для забезпечення плавної координації між агентами. Додавання проксимального члена (штрафу за відхилення від попереднього або узгодженого значення) до цільової функції кожного агента допомагає стабілізувати процес пошуку рішення, особливо в задачах з негладкими функціями.

Також слід відзначити ряд важливих методів оптимізації, що призначені для специфічних архітектур мережі.

Метод декомпозиції умов оптимальності (Optimality Condition Decomposition)[4]. Цей метод базується на розкладанні глобальної задачі оптимізації на підзадачі через умови оптимальності Каруша-Куна-Таккера (ККТ). Кожна підсистема розв'язує локальну задачу, а координатор узгоджує граничні змінні так, щоб виконувались глобальні ККТ-умови. Застосовується в енергосистемах для багаторівневої взаємодії (наприклад, між оператором системи передачі та операторами систем розподілу, чи між агрегатором та РДЕ).

Метод аналітичного каскадування цілей (Analytical Target Cascading)[5]. Використовується ієрархічний підхід, у якому глобальна цільова функція розкладається на підцілі для нижчих рівнів системи. Кожен рівень виконує оптимізацію з урахуванням цільових параметрів, переданих зверху, і формує локальні "цілі-відповіді" для узгодження з вищим рівнем.

Метод консенсусу з інноваційним зворотним зв'язком [6]. Це повністю децентралізований підхід, що застосовується для однорангових (peer-to-peer) мереж, у якому всі агенти досягають згоди щодо спільних параметрів (наприклад, граничної ціни електроенергії) виключно через локальну взаємодію з сусідніми агентами ("консенсус"), одночасно реагуючи на власні локальні зміни ("інновації"). У підсумку, всі агенти поступово зближуються до глобально узгодженого стану, не маючи єдиного координатора.

Висновки. Впровадження методів КДОПП є ключовою умовою переходу до інтелектуальних енергосистем майбутнього, що надає можливість ефективної інтеграції РДЕ, забезпечуючи при цьому надійність, стійкість та баланс енергосистеми в реальному часі. Поєднання швидких градієнтних методів зі зворотним зв'язком і надійних алгоритмів координації, таких як метод змінних напрямків множників Лагранжа та метод декомпозиції умов оптимальності, створює основу для ефективного керування потоками потужності в активних мережах. Подальший розвиток пов'язаний із впровадженням елементів машинного навчання, асинхронної комунікації та мультиагентних протоколів, що дозволить реалізувати реальне самокоординоване управління РДЕ у режимі реального часу.

Список використаних джерел:

1. Magnusson S., Qu G., Li N. Distributed optimal voltage control with asynchronous and delayed communication. IEEE transactions on smart grid. 2020. Vol. 11, no. 4. P. 3469–3482. URL: <https://doi.org/10.1109/tsg.2020.2970768> (date of access: 06.11.2025).
2. Erseghe T. Distributed optimal power flow using ADMM. IEEE transactions on power systems. 2014. Vol. 29, no. 5. P. 2370–2380. URL: <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2014.2306495> (date of access: 06.11.2025).
3. A proximal atomic coordination algorithm for distributed optimization / J. J. Romvarey et al. IEEE transactions on automatic control. 2021. P. 1. URL: <https://doi.org/10.1109/tac.2021.3053907> (date of access: 06.11.2025).
4. Kim B. H., Baldick R. Coarse-grained distributed optimal power flow. IEEE transactions on power systems. 1997. Vol. 12, no. 2. P. 932–939. URL: <https://doi.org/10.1109/59.589777> (date of access: 06.11.2025).
5. Tosserams S., Etman L. F. P., Rooda J. E. An augmented Lagrangian decomposition method for quasi-separable problems in MDO. Structural and multidisciplinary optimization. 2006. Vol. 34, no. 3. P. 211–227. URL: <https://doi.org/10.1007/s00158-006-0077-z> (date of access: 06.11.2025).
6. Distributed reactive power feedback control for voltage regulation and loss minimization / S. Bolognani et al. IEEE transactions on automatic control. 2015. Vol. 60, no. 4. P. 966–981. URL: <https://doi.org/10.1109/tac.2014.2363931> (date of access: 06.11.2025).

НІЦАК Ярослав Миколайович, аспірант
БОСАК Алла Василівна, к.т.н., доцент
 Національний технічний університет України
 «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ КОМПРЕСОРНИХ УСТАНОВОК ЗАСОБАМИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ З ЦИФРОВИМ ДВІЙНИКОМ

Вступ. Промислові компресорні установки відіграють важливу роль у багатьох технологічних процесах і залишаються одним із найенергоємніших видів обладнання, що актуалізує питання підвищення їх енергоефективності, особливо з огляду на зростання цін на енергоносії [1-3]. Запровадження частотно-регульованих приводів (ПЧ) є ефективним способом зменшення енергоспоживання завдяки адаптації роботи компресора до змінного навантаження [4]. Однак ефективність ПЧ значною мірою залежить від рівня інтелекту системи керування, яка повинна забезпечувати оптимальні рішення в реальному часі. Більшість сучасних досліджень зосереджуються на порівнянні ефективності різних стратегій керування, проте недостатньо уваги приділяється питанням архітектури та методології побудови універсальних, масштабованих рішень для практичного впровадження інтелектуального керування.

Метою роботи є вирішення науково-технічної задачі, що полягає у розробці системної архітектури для інтелектуального керування компресорними установками. Для досягнення цієї мети пропонується архітектурний підхід на основі цифрового двійника, що забезпечує перехід від локального регулювання до цілісного, проактивного керування, заснованого на прогнозуванні поведінки фізичного об'єкта та оптимізації його режимів роботи.

Матеріали та результати. В основі запропонованої системи лежить чотирирівнева ієрархічна архітектура (рис. 1), що реалізує принципи кібер-фізичних систем шляхом тісної інтеграції фізичних процесів компресорної установки з обчислювальними можливостями інтелектуальних алгоритмів [5]. Архітектура організовує два фундаментальні потоки: висхідний потік даних (від фізичного об'єкта до віртуальної моделі) та низхідний потік керуючих команд (від інтелектуального ядра до виконавчих механізмів), забезпечуючи таким чином замкнений контур проактивного керування [6].

Запропонована архітектура реалізує замкнений контур керування. *Фізичний рівень*, що складається з компресорної установки, сенсорної підсистеми та частотного перетворювача, є джерелом даних та об'єктом керування. *Рівень збору та передачі даних* за допомогою ПЛК та промислових протоколів забезпечує надійний висхідний інформаційний потік до *рівня цифрового двійника*. Це програмне ядро системи, де на основі моделей машинного навчання відбувається перетворення сирих даних на прикладні знання: ідентифікація поточного стану, прогнозування енергоспоживання та аналіз операційних сценаріїв. Отримана аналітична інформація передається на *рівень інтелектуального керування*, де когнітивний модуль оптимізації приймає рішення, формує оптимальні керуючі команди та відправляє їх низхідним потоком на виконавчі механізми фізичного рівня, забезпечуючи проактивне енергоефективне функціонування системи.

Для практичної апробації запропонованої архітектури було проведено експериментальне дослідження, що базувалося на аналізі реальних експлуатаційних даних. Використовувалися два набори даних, що представляють собою часові ряди операційних параметрів, зняті з двох промислових компресорних установок: перша функціонує за традиційною позиційною стратегією керування («Без ПЧ»), а друга оснащена частотним перетворювачем та працює за адаптивною стратегією («З ПЧ»). Кожен набір даних містив синхронізовані виміри ключових параметрів, зокрема: час (Time), струм двигуна (Motor Current), швидкість обертання (Motor Speed) та відсоток продуктивності (Capacity

Percentage). На етапі попередньої обробки дані були очищені від текстових символів та артефактів, приведені до числових типів та нормалізовані для подальшого аналізу.

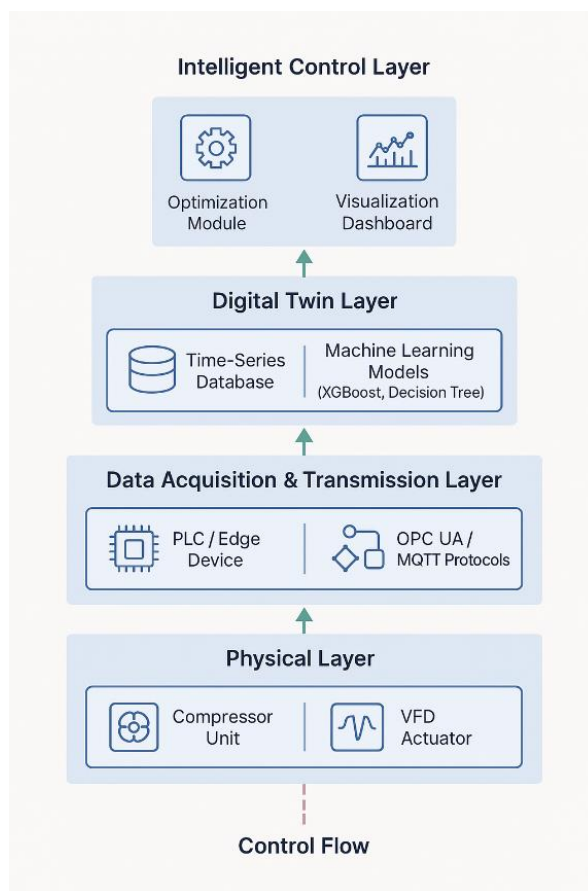


Рисунок 1 – Діаграма інтелектуальної системи керування

Експеримент полягав у валідації трьох ключових аналітичних модулів, що є ядром цифрового двійника в запропонованій архітектурі. По-перше, було реалізовано *модуль класифікації режимів* на основі алгоритму Decision Tree для забезпечення ситуаційної обізнаності системи. По-друге, розроблено *модуль предиктивного моделювання* на базі XGBoost для прогнозування енергоспоживання, що є основою проактивного керування. По-третє, застосовано *модуль аналізу сценаріїв* з використанням методу KMeans для виявлення типових патернів роботи та оцінки гнучкості системи.

Результати експерименту повністю підтвердили працездатність запропонованої архітектури та продемонстрували значні переваги інтелектуального адаптивного керування. Ключові кількісні показники зведені в табл. 1.

Таблиця 1. Результати валідації аналітичних модулів цифрового двійника

Показник	Без ПЧ	З ПЧ
Середній струм (А)	256.88	86.63
Точність класифікатора (%)	100.0%	100.0%
MAE предиктивної моделі (А)	6.74	2.86
Кількість сценаріїв (кластерів)	2	4

Аналіз показав, що середнє споживання струму для системи з ПЧ (86.63 А) є на 66.3% нижчим порівняно з системою без ПЧ (256.88 А), що є прямим доказом високої енергоефективності. Обидва класифікатори досягли 100% точності, що свідчить про

надійність ідентифікації поточного стану системи. Важливо відзначити, що помилка прогнозування (MAE) для адаптивної системи виявилася більш ніж удвічі нижчою (2.86 А проти 6.74 А), що вказує на її вищу стабільність та передбачуваність. Нарешті, аналіз сценаріїв виявив 4 стійкі режими роботи для системи з ПЧ проти 2 режимів у традиційної, що кількісно підтверджує її вищу операційну гнучкість.

Висновки. У результаті проведеного дослідження розроблено та експериментально валідовано комплексну чотирирівневу архітектуру інтелектуальної системи керування на основі цифрового двійника. Практична апробація на реальних промислових даних підтверджує життєздатність запропонованого архітектурного рішення: висока точність аналітичних модулів доводить, що цифровий двійник може надійно виконувати свої ключові функції — ситуаційної обізнаності та проактивного прогнозування стану.

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. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100751>
2. Cárcel-Carrasco, Javier, Manuel Pascual-Guillamón, and Fidel Salas-Vicente. "Improve the energy efficiency of the cooling system by slide regulating the capacity of refrigerator compressors." *Applied Sciences* 11.5 (2021): 2019. <https://doi.org/10.3390/app11052019>
3. Shi, Junli, et al. "Energy consummation and environmental emissions assessment of a refrigeration compressor based on life cycle assessment methodology." *The International Journal of Life Cycle Assessment* 20 (2015): 947-956. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0896-5>
4. Liang, Huibin & Li, Xuehua. (2011). Applications of Frequency Conversion Technology in Air-compressor Units Control System. *Procedia Engineering*. 15. 944-948. DOI: [10.1016/j.proeng.2011.08.174](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.08.174)
5. Mohd Javaid, Abid Haleem, Ravi Pratap Singh, Rajiv Suman. An integrated outlook of Cyber–Physical Systems for Industry 4.0: Topical practices, architecture, and applications. *Green Technologies and Sustainability*. Volume 1. Issue 1. 2023. 100001. ISSN 2949-7361, <https://doi.org/10.1016/j.grets.2022.100001>.
6. Hamzah M, Islam MM, Hassan S, Akhtar MN, Ferdous MJ, Jasser MB, Mohamed AW. Distributed Control of Cyber Physical System on Various Domains: A Critical Review. *Systems*. 2023; 11(4):208. <https://doi.org/10.3390/systems11040208>

МОДЕЛЬ ІНТЕГРОВАНОЇ ПІДГОТОВКИ ЕНЕРГОМЕНЕДЖЕРІВ

Вступ. В умовах гострої потреби України в досягненні енергетичної незалежності та посилення політики декарбонізації, роль кваліфікованих енергоменеджерів стає ключовою. Особливо актуальною ця проблема є для муніципального сектору, де бюджетні заклади — лікарні та школи — є значними споживачами енергоресурсів і водночас мають найбільший потенціал до енергозбереження.

Метою роботи є аналіз та обґрунтування ефективності інноваційної моделі підготовки енергоменеджерів на базі ЧДТУ, що ґрунтується на синергії з муніципальними структурами та закладами бюджетної сфери.

Для досягнення поставленої мети були визначені наступні **завдання**:

- окреслити ключові компетенції сучасного енергоменеджера, необхідні для ефективної роботи в муніципальному секторі.
- описати інноваційні педагогічні методики, що застосовуються в ЧДТУ, зокрема проектно-орієнтоване навчання (PBL), використання цифрових двійників та технологій VR/AR.
- розкрити механізм практичної співпраці між університетом, енергоменеджерами Черкаської міської ради та закладами освіти й охорони здоров'я.
- проаналізувати переваги інтегрованої моделі для всіх сторін: підвищення якості підготовки студентів, вирішення реальних завдань для міста та формування кадрового резерву.

ЧДТУ впроваджує новаторську освітню модель, яка долає традиційний розрив між академічною теорією та жорсткими вимогами реального ринку праці. Замість ізольованого навчання, університет став центром практико-орієнтованої екосистеми, що ґрунтується на глибокій та дієвій синергії.

В основі цієї моделі лежить тристороння співпраця (Tripartite Model), яка об'єднує:

1. Академічну експертизу (кафедра енерготехнологій ЧДТУ).
2. Управлінський досвід (практикуючі енергоменеджери Черкаської міської ради).
3. Реальний сектор (комунальні заклади — лікарні та школи міста).

Цей підхід перетворює заклади охорони здоров'я та середньої освіти на унікальні "живі лабораторії" (Living Labs), де теоретичні знання студентів негайно проходять перевірку практикою.

Навчальний процес деконструйований та зібраний заново, де кожен елемент має чітку практичну мету, а виклики для студентів формуються не викладачами, а реальним станом міського господарства.

1. Проектно-орієнтоване навчання (PBL) на реальних об'єктах. Це ядро всієї моделі. Студенти не просто пишуть курсові роботи "в стіл", а працюють над комплексними проектами для конкретних шкіл, дитсадків чи поліклінік.

Кожна студентська група працює під подвійним керівництвом: науковий керівник від ЧДТУ надає методологічну базу, а енергоменеджер міської ради виступає в ролі замовника та практичного наставника.

Студенти отримують прямий доступ до систем муніципального енергомоніторингу. Вони вчаться аналізувати не абстрактні цифри, а реальні погодинні та добові графіки споживання тепла, води та електроенергії конкретної лікарні. Вони вчаться бачити аномалії: нічне переспоживання у школі, неефективну роботу котельні тощо.

Робота включає повний цикл:

- енергоаудит: Вийзд на об'єкт, інструментальні вимірювання (де це можливо), аналіз документації.

- розробка заходів: Пропозиція конкретних технічних рішень (від встановлення ІТП до модернізації освітлення).

- техніко-економічне обґрунтування (ТЕО): Це ключовий етап. Студенти вчаться розраховувати не лише фізичну економію (Гкал, кВт·год), але й фінансові показники: період окупності (PP), чисту приведену вартість (NPV) та внутрішню норму дохідності (IRR).

2. Імерсивні технології: Безпечна практика у VR/AR. Впровадження енергоефективних заходів у діючих лікарнях чи школах вимагає високої точності та мінімального втручання. Для підготовки до цього ЧДТУ використовує передові технології симуляції.

Університет створює детальні цифрові моделі типових будівель (наприклад, стандартного проєкту школи чи поліклініки). У цьому віртуальному середовищі студенти можуть тестувати гіпотези без ризику: "Що станеться, якщо ми утеплимо лише північний фасад?", "Як зміниться мікроклімат у палатах, якщо ми встановимо систему рекуперації?", "Якою буде економія від впровадження BMS (Building Management System)?"

Перед виходом на реальний об'єкт студенти "набивають руку" у віртуальній реальності. Вони вчаться користуватися віртуальним тепловізором для пошуку тепловтрат, "налаштовувати" віртуальний тепловий пункт, не боячись "зламати" дорогу апаратуру. Це особливо важливо для критичних об'єктів інфраструктури, як-от лікарні.

3. Гейміфікація та управлінські симулятори. Робота енергоменеджера — це не лише техніка, але й фінанси, менеджмент та психологія. Для розвитку цих навичок використовуються бізнес-симулятори, адаптовані під місцеві реалії.

Студент отримує роль енергоменеджера, наприклад, "Черкаської міської лікарні №3". Йому надаються реальні дані про споживання та фіксований річний бюджет.

Симуляція кидає виклики: "Ціна на газ зросла на 20%", "Директор школи відмовляється впроваджувати режим економії", "Вийшло з ладу обладнання". Студент має приймати рішення в умовах обмеженого часу та ресурсів, миттєво отримує наслідки своїх дій на віртуальному рахунку закладу. Це розвиває стратегічне мислення та навички антикризового управління.

4. Розвиток "М'яких навичок" (Soft Skills) через реальний захист. Фінальний етап кожного проєкту — це не просто оцінка в заліковій книжці. Це публічний захист розробленого ТЕО перед комісією, до якої входять викладачі ЧДТУ, практикуючі енергоменеджери міської ради та, часто, керівники закладів освіти чи охорони здоров'я, для яких цей проєкт розроблявся.

Під час такого захисту студент вчиться не лише показувати розрахунки, але й аргументувати, переконувати та "продавати" свою ідею керівнику-господарнику, який мислить категоріями бюджету та комфорту.

Висновки. Завдяки такій інтегрованій моделі, випускник ЧДТУ — це не просто теоретик, а "готовий до впровадження" спеціаліст. Він не лише володіє технічними знаннями, але й: розуміє специфіку бюджетної сфери, має практичний досвід роботи з реальними системами енергомоніторингу, володіє навичками фінансового аналізу та переговорів, має портфоліо з реально розроблених проєктів для міських об'єктів.

Список використаної літератури

1. ISO 50001:2018. *Energy management systems — Requirements with guidance for use*. International Organization for Standardization.

ОСОБЛИВОСТІ ЕНЕРГЕТИЧНОГО АУДИТУ ПІДПРИЄМСТВ БУДІВЕЛЬНОЇ ГАЛУЗІ В КОНТЕКСТІ ЧИННОГО ЗАКОНОДАВСТВА

Будівельна промисловість є однією з найенергоємніших галузей та ключовим об'єктом декарбонізації України. Саме тому відповідно до норм Закону України «Про енергетичну ефективність» підприємства з річним споживанням енергії від 100 тис МВт·год і вище були зобов'язані до 14 листопада 2025 року провести енергетичний аудит і зареєструвати витяг зі звіту про енергетичний аудит в єдиній базі даних витягів із звітів з енергетичного аудиту.

В статті систематизовано ключові особливості енергоаудиту підприємств будівельної галузі, зокрема, проаналізовано структуру енергоспоживання, домінування теплової енергії у високотемпературних технологічних процесах і суттєве споживання електричної енергії у допоміжних системах. Наголошено, що енергоаудит потужних промислових підприємств, зокрема, будівельної галузі, базується на порівняльному аналізі з найкращими доступними технологіями та зміщує фокус з пошуку легкодоступних можливостей енергозбереження на підвищення рівня енергетичної ефективності в напрямі обґрунтування стратегічних, високовартісних проєктів, як то заміщення палива, впровадження розосереджених енергетичних ресурсів тощо. Окремо висвітлено гостру нормативно-правову колізію, яка наразі склалася в Україні, що унеможливує належну реєстрацію результатів енергоаудиту процесів у встановлений законом спосіб.

Запропоновані за результатом енергетичного аудиту шляхи зменшення енергоспоживання та підвищення рівня енергетичної ефективності підприємств будівельної галузі набувають сьогодні нового вмісту в перспективі надвисокої потреби в будівельних матеріалах і конструкціях задля післявоєнного відновлення України.

Вступ. В умовах інтеграції України до європейського енергетичного простору та глобального тренду на декарбонізацію, підвищення енергетичної ефективності промисловості стає ключовим завданням. Будівельна галузь із суттєвим енергоспоживанням та важкоскорочувальними викидами опинилася в центрі уваги через значне споживання первинних енергоресурсів та суттєві викиди парникових газів.

Набуття чинності Закону України «Про енергетичну ефективність» [1] створило нову законодавчо-регуляторну реальність для промисловості. Зокрема, статтю 10 Закону [1] суб'єктів господарювання із середнім рівнем річного енергоспоживання 100 тис. МВт·год та вище зобов'язано здійснити обов'язковий енергетичний аудит та зареєструвати витяг зі звіту про енергетичний аудит в єдиній базі даних звітів про енергетичний аудит. Саме тому підприємства будівельної галузі є одними з першочергових об'єктів для виконання цієї норми Закону [1].

Законом [1] встановлено чіткий термін: перший такий енергоаудит має бути проведено упродовж чотирьох років з дня набуття чинності Закону [1], тобто до 14 листопада 2025 року. Водночас, виконання цієї вимоги стикається не лише з технічними, але й з непередбачуваними регуляторними бар'єрами. Тому необхідно проаналізувати як технічні особливості енергоаудиту такого складного об'єкта, так і висвітлити правову колізію, що склалася в Україні на сьогодні.

Метою досліджень є ідентифікація та систематизація специфічних особливостей проведення енергоаудиту процесів на сучасному будівельному підприємстві, а також аналіз практичних та законодавчих викликів, що стоять перед енергоаудиторами та зобов'язаними підприємствами під час виконання вимог статті 10 Закону [1].

Матеріал досліджень. Дослідження базуються на результатах комплексного енергоаудиту будівельного підприємства та аналізі чинної нормативної бази.

Об'єктом дослідження є підприємство будівельної галузі із річним споживанням електричної енергії понад 150 тис. МВт·год, що підпадає під дію Закону [1]. У ході досліджень виявлено чотири ключові особливості енергоаудиту таких об'єктів:

1. Змішана структура енергоспоживання. На відміну від багатьох інших підприємств, енергетичний баланс будівельного підприємства має чітку двійчасту структуру:

- теплова енергія майже в повному обсязі споживається високотемпературним технологічним процесом. Енергоаудит фокусувався на оптимізації паливного балансу (заміщення газу/вугілля альтернативним паливом) та скороченні теплових втрат через корпус печі.

- електрична енергія споживається допоміжними системами. Енергоаудит виявив, що понад 55 % усієї електроенергії витрачається на підготовчі процеси, 23 % – на основний технологічний процес, 4 % – на системи стисненого повітря, решта 18 % – на інші допоміжні системи (водопостачання, освітлення, опалення, вентиляція).

2. Пріоритет порівняльного аналізу (бенчмаркінгу) [2]. Енергоаудит сучасного підприємства не може базуватися лише на виявленні очевидних втрат. Ключовим інструментом є порівняльний аналіз питомих показників об'єкта з найкращими доступними технологіями (ВАТ) [3]. На досліджуваному підприємстві зафіксовано показники:

- питомого споживання теплової енергії на рівні 3,14 ГДж/т продукції (ВАТ: 2,9–3,8 ГДж/т);

- питомого споживання електричної енергії на рівні 89,9 кВт·год/т продукції (ВАТ: 80–130 кВт·год/т).

Це свідчить, що основний технологічний процес підприємства вже відповідає ВАТ. Такий висновок кардинально змінює фокус енергоаудиту: пошук економії зміщується від основного процесу в бік допоміжних систем, де виявлено застарілі двигуни з низьким класом енергоефективності, неефективну систему керування компресорами, лампи ДРЛ, а також в напрямі аналізу застарілих виробничих ділянок.

3. Масштаб та стратегічний фокус заходів з підвищення рівня енергетичної ефективності. Річне споживання підприємства робить рентабельними амбітні проєкти з високими капіталовкладеннями. Енергоаудит у цьому випадку виходить за межі простих рекомендацій (заміна джерел світла, встановлення частотних перетворювачів) і стає інструментом обґрунтування стратегічних інвестицій з капітальними витратами в десятки мільйонів Євро, таких як: будівництво власної вітрової електростанції (ВЕС), інсталяція установок зберігання електроенергії (УЗЕ) та проведення технологічної модернізації.

4. Але найгострішою проблемою, виявленою під час проведення енергоаудиту, виявилися не технічні, а законодавчо-регуляторні бар'єри. Наближається дедлайн (14.11.2025), коли потужні споживачі мають провести перший енергоаудит.

Статею 10 (п. 6) Закону [1] та Постанова Кабінету Міністрів України № 1258 [4] вимагають від енергоаудитора реєстрації витягу зі звіту про енергоаудит у відповідній базі даних. В той самий час, Постановою Кабінету Міністрів України № 54 (п. 13) [5] уточнено, що така реєстрація має відбуватися через електронний кабінет енергетичного аудитора. Проте, станом на листопад 2025 року такої бази даних не існує, а в електронному кабінеті енергоаудитора відсутні технічні можливості та інструментарій для завантаження і реєстрації витягів зі звітів про енергоаудити процесів.

Таким чином, наразі склалася правова колізія: підприємства зобов'язані провести енергоаудит і зареєструвати його результати до 14 листопада 2025 року, але держава досі не надала інструментарію для такої реєстрації.

Висновки. Енергетичний аудит сучасного будівельного підприємства суттєво відрізняється від енергоаудиту підприємств інших галузей, зокрема, характеризується двійчастою структурою (тепло/електроенергія) та пріоритетом аналізу паливного балансу.

Ключовим інструментом є порівняльний аналіз з ВАТ, який дозволяє змістити фокус з високоефективного основного процесу в бік оптимізації допоміжних систем, де і зосереджено основний потенціал економії.

Великий масштаб електроспоживання робить економічно доцільними стратегічні проекти з власної генерації (ВЕС) та накопичення енергії (УЗЕ), перетворюючи енергоаудит з інструменту економії на інструмент формування стратегії сталого розвитку підприємства та забезпечення енергетичної безпеки.

Під час проведення енергетичного аудиту виявлено критичну нормативно-правову колізію: наближається встановлений Законом [1] реченець (14.11.2025) для обов'язкової реєстрації витягів з енергоаудитів, проте відповідну інфраструктуру – базу даних витягів та функціонал електронного кабінету енергоаудитора – не підготовлено для такої реєстрації. Це робить неможливим виконання зобов'язаними суб'єктами господарювання норм Закону [1] в повному обсязі та вимагає негайної реакції з боку Міністерства енергетики та Держенергоефективності.

Запропоновані за результатом енергетичного аудиту шляхи зменшення енергоспоживання та підвищення рівня енергетичної ефективності підприємств будівельної галузі набувають сьогодні нового змісту в перспективі надвисокої потреби в будівельних матеріалах і конструкціях задля післявоєнного відновлення України.

Список використаних джерел

1. Закон України «Про енергетичну ефективність» № 1818-IX від 21.10.2021 р. (в редакції від 01.01.2025 р.). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1818-IX#Text>
2. ДСТУ EN 16231:2017 Методологія бенчмаркінгу енергетичної ефективності (EN 16231:2012, IDT).
3. Best available techniques (BAT) reference document for the production of cement, lime and magnesium oxide – Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (integrated pollution prevention and control), Publications Office, 2013. URL: <https://data.europa.eu/doi/10.2788/12850>
4. Постанова Кабінету Міністрів України № 1258 від 01.12.2023 р. «Про затвердження Порядку проведення та вимог до енергетичного аудиту процесів та транспорту». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1258-2023-%D0%BF#Text>
5. Постанова Кабінету Міністрів України № 54 від 19.01.2024 р. «Про затвердження Порядку ведення та оприлюднення бази даних витягів із звітів з енергетичного аудиту, незалежного моніторингу витягів із звітів з енергетичного аудиту, незалежної верифікації звітів з енергетичного аудиту». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/54-2024-%D0%BF#Text>

МЕТОДИЧНІ ЗАСАДИ ФОРМУВАННЯ АНКЕТИ ДЛЯ ОПИТУВАННЯ З ПИТАНЬ ОЦІНЮВАННЯ БЕЗПЕКИ ПОСТАЧАННЯ

Анотація: В роботі проаналізовані сучасні методичні засади формування анкети для опитування з питань оцінювання безпеки постачання. Основна увага сконцентрована на вивченні можливостей використання експертних оцінок для визначення вагових коефіцієнтів критеріїв безпеки постачання електричної енергії на основі початкових значень, отриманих у попередніх дослідженнях. Методологія дослідження базується на використанні знань та досвіду експертів для формування багатокритеріальної оцінки, коли об'єктивні дані є недостатніми або потребують уточнення. Використання методу експертних оцінок має дати змогу отримати структуровану систему вагових коефіцієнтів та визначити значущість різних критеріїв.

Ключові слова: експертні методи оцінювання, безпека постачання електричної енергії, вагові коефіцієнти критеріїв, критерії безпеки.

Вступ. Розвиток сучасних енергетичних систем в Україні спрямований на забезпечення дотримання міжнародних стандартів, принципів та практик Європейського Союзу [1], а також на підвищення рівня безпеки постачання електричної енергії. Це завдання є актуальним як у мирний час, так і в умовах надзвичайних ситуацій. Проте складність сучасних енергосистем, їх масштабність та наявність стохастичних факторів створюють нові ризики для безперебійного постачання електроенергії [2]. Внаслідок цього виникає потреба у багатофакторній оцінці безпеки, яка дозволить визначити найбільш значущі критерії, що впливають на стабільність енергопостачання, та створить передумови для підвищення його надійності. У зв'язку з цим значна частина рішень може бути отримана шляхом використання якісних оцінок, що базуються на знаннях та досвіді експертів.

Мета роботи та завдання. Метою роботи є аналіз методичних засад формування анкети для опитування з питань оцінювання безпеки постачання.

Матеріал і результати досліджень. Для аналізу безпеки постачання електричної енергії може використовуватися велика кількість параметрів [3]. Однак врахування всіх одночасно є непрактичним, оскільки це ускладнює процес аналізу та потребує значних обчислювальних ресурсів. Тому доцільним є виділення найбільш важливих факторів, які визначають рівень безпеки, та проведення їх порівняльної оцінки.

У зв'язку з цим значна частина рішень може бути отримана шляхом використання якісних оцінок, що базуються на знаннях та досвіді експертів. Для цього широко застосовуються методи SWOT-аналізу, Дельфі, а також метод аналізу ієрархій (MAI) [4]. Метод експертних оцінок (ЕО) було обрано завдяки його гнучкості та здатності враховувати різноманітні фактори, які важко формалізувати іншими методами. У даній роботі особливу увагу приділено тому, що експерти самостійно визначають вагові коефіцієнти критеріїв безпеки, спираючись на стартові значення, отримані у попередніх дослідженнях автора. Такий підхід дозволяє отримати більш обґрунтовану та адаптивну оцінку, яка враховує як технічні, так і організаційні аспекти функціонування енергосистеми.

На відміну від методів Монте-Карло чи сценарного аналізу, які потребують значних обсягів даних, метод експертних оцінок є ефективним у ситуаціях, коли дані обмежені або відсутні. Він також є менш ресурсозатратним, але дозволяє отримати релевантні результати, які можуть бути використані для прийняття управлінських рішень [5]. Якість отриманих ЕО значною мірою залежить від рівня підготовки експертизи та методів обробки інформації, отриманої від експертів. Процес проведення експертного оцінювання включає кілька етапів, які забезпечують системність, надійність та достовірність результатів.

Етап 1. Метод Дельфі є інструментом, що сприяє формуванню рішень або кращому розумінню проблеми, проте його ефективність можлива лише за умови активної участі тих осіб, які прийматимуть рішення та реалізовуватимуть їх на практиці. Важливо також, щоб члени експертної групи мали достатню мотивацію включити завдання Дельфі у свій робочий розклад, насичений іншими пріоритетними справами. Ключовим аспектом є правильний добір експертів, адже недостатньо організована процедура відбору може знизити якість результатів і зробити висновки менш значущими.

З цієї причини запрошення до участі в опитуванні буде направлено до організацій, що відіграють провідну роль у формуванні енергетичної політики та розвитку енергетичного сектору України.

Етап 2. На цьому етапі здійснюється вибір способу збору експертної інформації та визначення процедур її подальшої обробки. Для перевірки компетентності респондентів на початку опитування їм будуть ставитися запитання щодо сфери професійної діяльності, рівня освіти, трудового стажу та займаної посади [6]. Вибір саме цих характеристик пояснюється тим, що галузь діяльності безпосередньо впливає на специфіку знань і досвід експерта.

У процесі експертного оцінювання застосовуються шкали, побудовані на певних правилах. Виділяють чотири основні типи: номінальну, порядкову, інтервальну та шкалу відношення [7].

Вибір шкали залежить від завдання. Для оцінювання параметрів найчастіше застосовують порядкову або інтервальну шкалу. Остання забезпечує оптимальний баланс між простотою та деталізацією, дозволяє порівнювати результати й робити обґрунтовані висновки навіть без абсолютного нуля. Саме тому в подальшому дослідженні буде використано інтервальну шкалу.

Для такої шкали можуть застосовуватися різні методи:

- ранжування — впорядкування об'єктів за значущістю (від найважливішого до найменш важливого);
- парне порівняння — визначення більш значущого об'єкта в кожній парі, що зручно при великій кількості критеріїв;
- безпосередня оцінка — присвоєння балів у межах інтервалу, що дозволяє визначати не лише порядок, а й ступінь відмінностей.

Бальний метод особливо цінний, оскільки поєднує класифікацію з можливістю кількісно оцінити різницю між об'єктами. Це робить його гнучким, універсальним і придатним для різних типів завдань, забезпечуючи високу точність та обґрунтованість експертних оцінок.

Оскільки загальною ідеєю є оцінка безпеки постачання електричної енергії, то необхідно оцінити основні індикатори, що впливають на розрахунок оцінки безпеки постачання електричної енергії. Експертам $E_1, E_2, \dots, E_n$ буде запропоновано оцінити вплив індикаторів (бали $L_1, L_2, \dots, L_m$) запропонованих факторів $X_1, X_2, \dots, X_m$, виходячи зі своїх знань, досвіду та інтуїції.

Опитування буде здійснено в анонімному форматі, що забезпечує об'єктивність і щирість відповідей. Анонімність дозволила експертам висловлювати свої думки без побоювань щодо можливого впливу на їхню професійну репутацію або стосунки з роботодавцем. Такий підхід сприяє отриманню чесних і неупереджених відповідей, що підвищує достовірність результатів дослідження.

Етап 3. Експертам буде надано час для роздумів і надання відповіді приблизно 2,5 тижнів. Насамперед, це забезпечує достатній час для ретельного аналізу запитів та оцінки об'єктів. Експертам необхідно мати змогу повністю осмислити інформацію, дослідити всі аспекти питання і сформулювати обґрунтовану відповідь. Це важливо для забезпечення високої якості оцінок, особливо у випадках, коли рішення мають значний вплив на результати дослідження або прийняття рішень.

Водночас, оскільки йдеться про державні установи, які мають внутрішні процедури для обробки вхідних листів, надання відповіді може вимагати часу на їх опрацювання та

призначення відповідальних осіб через бюрократичні процеси. Державні органи часто мають певні регламенти та формальності щодо оформлення та потоку документів, які потребують додаткового часу для погодження, перевірки та опрацювання на різних рівнях. Таким чином, надання такого терміну дозволяє врахувати ці внутрішні процедури і забезпечити своєчасне та коректне виконання запиту.

Етап 4. Групова експертна оцінка може вважатися надійною тільки за умови узгодженості відповідей експертів. Для аналізу розбіжностей і узгодженості оцінок будуть використані статистичні характеристики, зокрема міри розкиду.

Варто зазначити, що максимальний бал для кожного індикатора становить 9. Це обумовлено тим, що в анкеті використовувалася 9-бальна шкала для оцінки наслідків L. При цьому, застосовуючи додавання, можна скласти ці оцінки та отримати комбіновану величину, яка наочно демонструє загальну значущість кожного фактора.

Висновки. Для оцінки безпеки постачання електричної енергії можуть використовуватися різні методи, зокрема аналітичні моделі, імітаційне моделювання, методи аналізу. Проте метод експертних оцінок дозволяє враховувати різноманітні фактори, які важко формалізувати за допомогою інших методів.

Використання експертних оцінок дозволить в подальшій роботі створити багатофакторну оцінку ризиків, за рахунок якої можна більш коректно оцінити безпеку постачання електричної енергії.

Список використаної літератури

1. Directive (EU) 2019/944 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 on common rules for the internal market for electricity. An official website of the European Union. URL: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-strategy/clean-energy-all-europeans-package_en (дата звернення: 31.10.2025).
2. Оцінка стійкості енергетичної інфраструктури України. Аналітичний звіт ГО «Діксі Груп». URL: <https://dixigroup.org/wp-content/uploads/2022/05/dixi-energy-resilience-str.pdf> (дата звернення: 31.10.2025).
3. Прищепя, Я., & Замулко, А. (2024). Використання індикативного підходу для оцінки безпеки постачання електричної енергії. Системні дослідження в енергетиці, (4 (80), 134-142).
4. 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. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.2.2022.261372> (дата звернення: 31.10.2025).
5. Олексієнко Р., Донець А. Місце експертної оцінки у прийнятті управлінських рішень. Економіка та суспільство. 2021. № 26. <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2021-26-59> (дата звернення: 31.10.2025).
6. Шостак І.В. Анкетування: методичні рекомендації щодо організації та проведення соціологічного дослідження. Острог, 2021. 40 с.
7. Пономарьова Н.О., Голиш І.Є. Основи опрацювання статистичних даних: навч. посіб. для здобувачів першого (бакалавр.) рівня вищ. освіти за спец. 014 Середня освіта (Інформатика). Харківський національний педагогічний університет ім. Г.С. Сковороди. Харків, 2025. 169 с.

ENERGY MANAGEMENT STRATEGIES IN VIRTUAL POWER PLANTS WITH EV FLEET INTEGRATION

Introduction. The electrification of transport and the rapid growth of renewable energy sources (RES) are transforming traditional power systems into decentralized, data-driven networks [1]. Electric vehicles (EVs) are emerging as mobile, flexible assets that can support grid balancing, reduce peak demand, and facilitate renewable energy integration [2]. When aggregated under a Virtual Power Plant (VPP), EVs form a distributed storage network capable of providing real-time grid support and improving system efficiency. VPPs coordinate diverse assets - EVs, renewable generation, and stationary storage - through intelligent energy management platforms (Fig. 1). This integration allows aggregated EV fleets to act as virtual storage pools that can charge during periods of surplus renewable generation and discharge when demand is high. The result is a more flexible, stable, and economically efficient energy system.

The purpose of this work is to analyze and systematize the key strategies for integrating EV fleets into VPPs and to identify how coordinated charging and discharging of EVs can enhance grid flexibility, support renewable energy integration, and improve overall economic efficiency. The study aims to demonstrate the role of smart energy management, aggregation, and KPI-based evaluation in transforming EVs from passive consumers into active contributors to sustainable, intelligent energy systems.

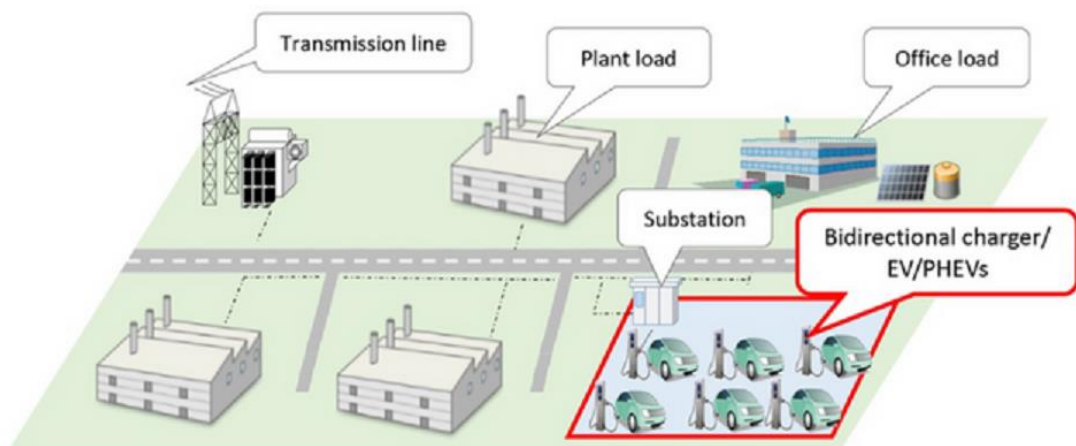


Figure 1 - Conceptual illustration of EV fleet integration within a Virtual Power Plant [3]

Materials and Methods

The integration of electric vehicle fleets into Virtual Power Plants offers substantial technical, economic, and environmental benefits that enhance system flexibility and sustainability. EVs can stabilize the grid by charging during low-demand periods and discharging at peak times, thus balancing supply and demand while reducing load stress. They also facilitate renewable energy integration by absorbing excess solar and wind power, mitigating curtailment, and enabling higher RES penetration. Through Vehicle-to-Grid functionality, aggregated EVs provide ancillary services such as frequency regulation, spinning reserves, and voltage support [4]. Coordinated charging and discharging improve operational efficiency, reduce grid costs, and can lower energy prices for consumers. As a result, EV-based VPPs are becoming essential components of smart energy systems, delivering flexibility where conventional assets lack responsiveness or scalability.

Despite these advantages, several challenges constrain large-scale deployment. The mobility of EVs makes their availability unpredictable, requiring aggregators to manage fluctuating connection patterns and user behaviour. Without intelligent coordination, mass charging could worsen peak demand, making smart control and secure communication crucial. Frequent cycling for

grid services may accelerate battery wear, demanding control strategies that balance efficiency with lifetime preservation. Large-scale integration also depends on appropriate infrastructure, including bidirectional chargers and digital communication systems. Overcoming these barriers requires joint progress in regulation, technology, and market design to ensure reliable and user-friendly participation of EVs in flexibility markets.

To fully realize the potential of EV integration, VPPs rely on coordinated technological and organizational measures that maintain grid stability and economic performance [5]. Aggregators play a central role by coordinating fleet operations and representing distributed EVs as a unified resource in electricity markets. Optimization algorithms and simulation tools support efficient dispatch by considering grid demand, energy prices, and vehicle availability, while intelligent charging aligns operation with both user preferences and system conditions. Predictive models enable adaptive control based on real-time data and forecasts of renewable output. Economic evaluation using indicators such as LCOS, Return on Investment, and Utilization Rate helps determine cost-effectiveness and operational reliability. Together, these measures transform EV fleets from passive consumers into active participants of a data-driven, decentralized energy ecosystem.

Table 1 - Benefits, challenges, and strategies for EV integration in Virtual Power Plants

Aspect	Key Benefits	Main Challenges	Management Strategies
Grid Stability	Load leveling, peak shaving	EV availability variability	Aggregator-based fleet scheduling
Renewable Integration	Absorbs surplus solar/wind energy	Intermittent generation	Smart forecasting and load matching
Ancillary Services	Frequency and voltage regulation	Communication and control latency	V2G-based coordinated response
Economic Efficiency	Reduced grid costs, optimized tariffs	Market access and incentive gaps	KPI-based performance evaluation
Battery Health	Optimized cycling extends lifespan	Accelerated wear under frequent use	Adaptive SoC and DOD control
User Participation	Lower energy bills, flexible mobility	Privacy and convenience concerns	User-centred smart-charging interfaces

Conclusions. Integration of electric vehicle fleets into Virtual Power Plants represents a crucial step toward flexible, resilient, and low-carbon energy systems. EVs, when properly aggregated and managed, can balance supply and demand, support renewable integration, and generate economic value for both operators and users. At the same time, the success of such systems depends on effective control algorithms, communication infrastructure, and regulatory support that recognize EVs as active participants in energy markets.

References:

1. Kostenko, G.P. (2023) Situation analysis of electric transport development prospects and its integration into Ukrainian power system. *Power Eng. Econ. Tech. Ecol.* 2023, 1, 71. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.1.2023.276185>
2. Bosak A., Kostenko, G., & Zaporozhets, A. (2025). *Power Eng. Econ. Tech. Ecol.* 2025, 3, 81. Electric Vehicle Battery Type Suitability in V2L Applications to Enhance Grid Load Flexibility: a Comparative Study. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.3.2025.339751>.
3. Construction of virtual power plant (VPP) using electric vehicles. Url: <https://www.challenge-zero.jp/en/casestudy/601>.
4. Zaporozhets, A., Kostenko, G., & Zgurovets, O. (2023). Preconditions and Main Features of Electric Vehicles Application for Frequency Regulation in the Power System. 3rd International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems (ITTAP 2023). *CEUR Workshop Proceedings*, 3628, 43-54. Url: <https://ceur-ws.org/Vol-3628/paper4.pdf>.
5. G. P. Kostenko, O. V. Zgurovets, and M. M. Tovstenko, "SWOT analysis of electric transport and V2G implementation for power system sustainable development in the terms of Ukraine," *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, vol. 1254, no. 1, p. 012030, Oct. 2023, doi: 10.1088/1755-1315/1254/1/012030.

НАУКОВІ ЗАСАДИ ФОРМУВАННЯ КОНЦЕПЦІЇ РОЗВИТКУ ЗАРЯДНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ В УКРАЇНІ

Розвиток електромобільного транспорту України формує нові вимоги до енергетичної, транспортної інфраструктури. Для забезпечення ефективної інтеграції України у європейський енергетичний простір необхідно створити науково обґрунтовану концепцію розвитку зарядної інфраструктури, що враховує технічні, просторові, економічні та екологічні чинники.

Нормативно-технічна база галузі потребує оновлення для узгодження з актуальними європейськими вимогами. Аналіз чинних стандартів показує, що частина ДСТУ, зокрема EN 62196 [1-3], EN 61851 [4], EN 50620 [5] потребує гармонізації з сучасними версіями ІЕС 2022–2024 рр. Водночас відсутність національних стандартів для протоколів ISO 15118-20 (Plug&Charge, V2G) [6] та OCPP 2.0.1 обмежує впровадження інтелектуального керування зарядними станціями та концепції Smart Charging. Така ситуація зумовлює потребу у комплексній системі оцінювання рівня розвитку та потенціалу зарядної інфраструктури, що стане науковим підґрунтям для розробки єдиної концепції її модернізації.

Станом на 2025 рік в Україні діє понад 2,5 тис. публічних зарядних пунктів, однак їх просторовий розподіл є нерівномірним: найбільша концентрація спостерігається у центральних та західних регіонах, що вимагає системної оцінки потенціалу розвитку мережі для збалансування транспортного навантаження й ефективного підключення до енергосистем.

Одним із ключових інструментів для цього є показник потенціалу розвитку (ППР), який дозволяє кількісно оцінити доцільність розміщення зарядних станцій на певній території. Розрахунок інтегрального показника базується на нормованих значеннях критеріїв з урахуванням їх вагових коефіцієнтів:

$$N_i = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}, \quad \text{ППР} = \sum_{i=1}^n w_i \cdot N_i,$$

де N_i – нормоване значення показника, w_i – ваговий коефіцієнт, $X_{\max}, X_{\min}$ – граничні значення, n – кількість критеріїв.

До узагальнених груп критеріїв належать:

1. Техніко-енергетичні – доступність електричних мереж, резерв потужності, можливість інтеграції ВДЕ;
2. Просторово-транспортні – інтенсивність трафіку, близькість до магістралей, транспортна доступність;
3. Соціально-економічні – очікуваний попит, щільність населення, інвестиційна привабливість регіону;
4. Екологічні – потенціал скорочення викидів, рівень забруднення, екологічна доцільність.

Вагові коефіцієнти w_i можуть визначатися методом експертного оцінювання або ентропійним методом. У другому випадку вони розраховуються за формулами:

$$e_i = -k \sum_{j=1}^m p_{ij} \ln(p_{ij}), \quad p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{j=1}^m x_{ij}},$$

$$k = \frac{1}{\ln(m)}, \quad w_i = \frac{1 - e_i}{\sum_{i=1}^n (1 - e_i)}.$$

де e_i - ентропія критерію; p_{ij} - частка значення i -го критерію для j -го об'єкта; k - коефіцієнт нормалізації; m - кількість об'єктів оцінювання; n - кількість критеріїв.

Чим більша ентропія e_i , тим менший внесок критерію у загальний результат, що знижує суб'єктивність оцінювання та підвищує об'єктивність аналізу. Використання ентропійного методу у розрахунку показника потенціалу розвитку (ППР) дає змогу кількісно визначити ваги критеріїв і забезпечити справедливий розподіл їхнього впливу на кінцеву оцінку.

Отриманий інтегральний показник може бути використаний для побудови карти просторового потенціалу зарядної інфраструктури, що дозволяє ранжувати території за рівнем доцільності встановлення зарядних станцій, виявляти регіони з найвищим рівнем техніко-енергетичної готовності та прогнозувати пріоритети розвитку. Такий підхід сприяє раціональному плануванню інвестицій, оптимізації енергетично-транспортної мережі та може бути застосований при розробці національної стратегії розвитку електротранспорту, енергетики та місцевих планів сталого руху.

Висновки. Формування наукових засад концепції розвитку зарядної інфраструктури електромобілів передбачає поєднання технічного, аналітичного та нормативного підходів. Використання інтегрального показника потенціалу розвитку із визначенням ваг за ентропійним методом підвищує об'єктивність оцінки, а гармонізація стандартів із вимогами AFIR [7] забезпечує технологічну сумісність України з європейським ринком зарядної інфраструктури.

Список використаної літератури

1. ДСТУ EN 62196-1:2015 Вилки, штепсельні розетки, переносні розетки та увідні пристрої транспортних засобів для провідного заряджання електромобілів. Частина 1. Загальні технічні вимоги (EN 62196-1:2014, IDT; IEC 62196-1:2014, MOD). - Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2025.
2. ДСТУ EN 62196-2:2019. Вилки, розетки, транспортні з'єднувачі та вводи. Провідність зарядження. Частина 2. Сумісність розмірів і вимоги взаємозамінності штиря та трубчастого виводу пристосувань для змінного струму (EN 62196-2:2017, IDT; IEC 62196-2:2016, IDT). – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019.
3. ДСТУ EN 62196-3:2019. Вилки, штепсельні розетки, переносні розетки та увідні пристрої транспортних засобів для провідного заряджання електромобілів. Частина 3. Вимоги до сумісності розмірів та взаємозамінності штирових і гніздових контактів з'єднувачів транспортних засобів постійного та змінного/постійного струму (EN 62196-3:2014, IDT; IEC 62196-3:2014, IDT). – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019.
4. ДСТУ EN IEC 61851-1:2021. Система зарядки електричних транспортних засобів дротова. Частина 1. Загальні вимоги (EN IEC 61851-1:2019, IDT; IEC 61851-1:2017, IDT). - Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2021. – 149 с.
5. ДСТУ EN 50620:2021. Кабелі електричні. Зарядні кабелі для електричних транспортних засобів (EN 50620:2017, IDT; BT(DE/NOT)259, IDT). – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2021. – 32 с.
6. ABB. *The Digital Side of Charging: The Future of OCPP and ISO 15118*. ABB E-mobility [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://e-mobility.abb.com/sites/default/files/2024-12/241218_ABB_White-Paper.pdf (дата звернення: 01.11.2025).
7. European Commission. *Alternative Fuels Infrastructure Regulation* [Електронний ресурс]. - Режим доступу: https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/clean-transport/alternative-fuels-sustainable-mobility-europe/alternative-fuels-infrastructure_en (дата звернення: 01.11.2025).

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

ВИКОРИСТАННЯ RBM АНАЛІЗУ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ЦИФРОВІЗАЦІЇ В РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ

Анотація: Проаналізовано можливості застосування методології управління, орієнтованого на результат (Results-Based Management, RBM) для оцінювання цифровізації та управління процесами цифровізації у розподільних електричних мережах України. Розглянуто теоретико-методологічні засади RBM, поточний стан цифровізації операторів систем розподілу (ОСР) в Україні. Показано, що RBM-підхід дозволяє забезпечити системність, прозорість і підзвітність у трансформації енергетичної галузі.

Ключові слова: цифровізація, оцінювання, управління, результат.

Актуальність. Сучасна енергетична система України опинилася перед низкою серйозних викликів: зростанням енергоспоживання, необхідністю підвищення енергоефективності, децентралізацією виробництва електроенергії, переходом до відновлюваних джерел енергії, а також необхідністю модернізації застарілої інфраструктури та відновлення пошкоджених об'єктів енергетичної інфраструктурою В умовах воєнного стану та інтеграції з енергетичним ринком ЄС цифровізація розподільних мереж набуває стратегічного значення як ключовий інструмент підвищення надійності, гнучкості та безпеки енергопостачання. Процес цифрової трансформації в Україні стикається з відсутністю системного управління, моніторингу і оцінювання результатів – що обумовлює потребу у впровадженні методів, орієнтованих на результат, таких як RBM.

Головною метою є теоретичне обґрунтування застосування методу RBM аналізу як інструменту для побудови системи оцінювання цифровізації розподільних мереж.

Виклад основного матеріалу

Енергетика сьогодення перебуває у фазі змін та трансформації, спричиненої глобальними викликами – зростанням енергоспоживання, децентралізацією виробництва енергії та переходом до відновлюваних джерел, потребою забезпечення енергоефективності, а також модернізацією застарілої інфраструктури, необхідністю впровадження енергоефективних та цифрових рішень, інтеграції до європейського енергетичного ринку. Впровадження цифровізації в розподільних електричних мереж є ключовим інструментом забезпечення стабільності, надійності та гнучкості енергетичних систем.

В Україні процес цифрової трансформації енергетики набуває стратегічного значення в контексті інтеграції з енергетичним ринком ЄС та виконання положень Угоди про асоціацію, а також викликами, які має долати енергетика під час воєнного стану. Водночас спостерігається дефіцит системного управління цими процесами, що обумовлює потребу у використанні методів, орієнтованих на результат [1–3].

Метод управління, орієнтований на результат (RBM) широко застосовується у міжнародній практиці для програм розвитку, державного управління та корпоративних перетворень. Використання RBM в цифровізації енергетичної сфери дозволяє структурувати процеси, забезпечити прозорість досягнення цілей і ефективне використання ресурсів [4].

Методологія RBM передбачає управління, що ґрунтується на досягненні чітко визначених результатів, вимірюваних через систему показників. Основна ідея полягає у послідовному відстеженні логічного ланцюга: ресурси → діяльність → продукти → результати → вплив.

RBM має чотири етапи реалізації: планування, виконання, моніторинг та оцінювання. У контексті оцінювання цифровізації в енергетиці RBM дозволяє:

- формалізувати стратегічну мету (наприклад, “зменшити втрати в мережі”, “підвищити частку цифрових підстанцій”);
- встановити чіткі показники (наприклад, % автоматизованих підстанцій, зниження показників SAIDI/SAIFI);
- відслідковувати, чи діяльність (впровадження SCADA, систем АМІ) дійсно призводить до очікуваних результатів;
- оцінювати, чи є вплив (наприклад, підвищення надійності, зменшення витрат) і чи відповідає він стратегічній меті.

RBM не просто технічна методика, вона включає управлінську культуру – орієнтацію на результат, підзвітність, навчання з отриманих даних, адаптацію дій. В міжнародній практиці RBM застосовується у розвитку державних програм, проєктах донорів, трансформаціях організацій [4].

Упродовж останніх років в Україні прийнято низку документів, які визначають основні напрями цифрової трансформації. Зокрема: Порядок розроблення та подання на затвердження планів розвитку систем розподілу та інвестиційних програм операторів систем розподілу [1]. Стратегія цифрової трансформації енергетики України (Міненерго, 2021) [2]. Концепція розвитку цифрової економіки та суспільства України (2018–2025) [3].

До основних проблем цифровізації належать: відсутність єдиної галузевої цифрової платформи; дефіцит кваліфікованих кадрів у сфері цифрових технологій; фрагментарне фінансування та відсутність довгострокових інвестиційних планів; проблеми кібербезпеки та захисту даних; низький рівень цифрової культури серед персоналу [4–5].

У процесі цифровізації розподільних мереж формується складна система взаємодії між різними групами інтересів. Основними стейкхолдерами виступають державні органи (Міненерго, НКРЕКП, Мінцифри), оператори систем розподілу, приватні енергетичні компанії, ІТ-сектор, а також кінцеві споживачі. Їхні інтереси об’єднує потреба у підвищенні ефективності управління, прозорості процесів та безпеці енергетичних даних. Крім того, зростає роль наукових та освітніх установ, які формують кадровий і дослідницький потенціал для цифрової трансформації галузі. Вони виступають посередниками між технологічним бізнесом і державним сектором, сприяючи впровадженню інновацій через підготовку фахівців і розроблення адаптованих до українських умов моделей управління.

Реалізація цифрової трансформації в енергетичному секторі потребує поетапного підходу, що базується на принципах RBM – управління, орієнтованого на результат. План має охоплювати три рівні: стратегічний, операційний та аналітичний.

Ключові заходи:

Стратегічне планування: створення нормативної бази цифрової енергетики, стандарти обміну даними, кібербезпеки, управління енергетичними платформами.

Операційний рівень: впровадження інтелектуальних систем обліку, модернізація ІКТ-інфраструктури, навчання персоналу, створення відкритих API.

Моніторинг і оцінювання: запровадження плану моніторингу з KPI.

Особливу увагу потрібно приділити ризик-менеджменту цифровізації: розробка карти ризиків, регулярний аудит інформаційної безпеки, тестування резервних систем. RBM-підхід у поєднанні з адаптивним управлінням дозволяє швидко реагувати на технологічні, економічні чи нормативні зміни [6-7].

Висновки:

Методика оцінювання цифровізації орієнтована на результат є ефективною теоретично-прикладною основою для побудови системи оцінювання цифровізації в розподільних мережах. Застосування методики RBM аналізу дозволяє забезпечити системність і прозорість у процесі оцінювання результатів впровадження цифровізації, створити логічну модель взаємозв’язку між інвестиціями, проєктами впровадження цифровізації та реальними результатами, а також розробити набір складових для об’єктивного оцінювання результатів впровадження цифровізації в розподільних мережах.

Таким чином, методика RBM виступає ключовим методологічним інструментом у формуванні оцінювання цифровізації в розподільних мережах, трансформації енергетики України та дозволяє забезпечити системність, прозорість і підзвітність у трансформації енергетичної галузі.

Список використаних джерел

1. Постанова Кабінету Міністрів України від 04.09.2018 № 955 «Про затвердження Порядку розроблення та подання на затвердження планів розвитку систем розподілу та інвестиційних програм операторів систем розподілу». Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/955-2018-%D0%BF>
2. Міністерство енергетики України. *Стратегія цифрової трансформації енергетики України*. Київ, 2021. Режим доступу: https://mec.gov.ua/sites/default/files/strategy_digitalization_energy_2021.pdf – Назва з екрана.
3. Кабінет Міністрів України. *Концепція розвитку цифрової економіки та суспільства України на 2018–2025 роки*. Київ, 2018. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/55-2017-%D0%BF>
4. Results-based management handbook. Режим доступу: https://unhabitat.org/sites/default/files/2019/05/un-habitat_rbm_handbook_complete_0_0.pdf - Назва з екрана.
5. Strategic and legal aspects of digital transformation of the energy sector of Ukraine (focus on foreign economic policy) Режим доступу: <https://www.researchgate.net/publication/387543474>
6. Тімченко О.М. Організаційно-економічні детермінанти розвитку цифрової енергетики в Україні / О.М. Тімченко, В.В. Небрат, В.Е. Ліп, О.С. Биконя, Ю.В. Дубас // Економіка і прогнозування. – 2019 – 3: 78–100 – DOI: <https://doi.org/10.15407/eip2019.03.078>
7. Strategic and legal aspects of digital transformation of the energy sector of Ukraine: focus on foreign economic policy Режим доступу: <https://monograph.route.ee/rout/catalog/download/978-9916-9850-6-9.ch1/33/333-1?inline=1> – Назва з екрана.

МОНІТОРИНГ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ОБ'ЄКТІВ ТРАНСПОРТУ ТА НАПРЯМИ ПІДВИЩЕННЯ ЇХ РІВНЯ БЕЗПЕКИ І ЗАХИЩЕНОСТІ

Вступ. Електрифікована залізнична інфраструктура по всьому світу пропонує значні переваги, підвищуючи стійкість та ефективність транспортних мереж. У всьому світі країни інвестують в електрифіковані залізниці для покращення зв'язку, підтримки економічного зростання та сприяння сталому розвитку. Такі регіони, як Європа, Азія та деякі частини Північної Америки, є лідерами у розгалуженості електрифікованих залізничних мереж, демонструючи переваги цього чистішого, швидшого, енергоефективного виду транспорту.

Надійність та ефективність функціонування електрифікованих залізниць безпосередньо залежать від стабільної роботи систем тягового електропостачання. Ця критично важлива інфраструктура, що включає тягові підстанції, контактну мережу та лінії електропередач, функціонує в умовах високих електричних та механічних навантажень, а також є вразливою до кліматичних впливів та зовнішніх загроз, включно з цілеспрямованими диверсійними або військовими діями. Перехід від традиційних підходів регламентного обслуговування до концепції проактивного управління на основі даних [1] є ключовим фактором для забезпечення безпеки, підвищення енергоефективності та стійкості залізничного транспорту.

Війна в Україні підкреслила вразливість критичної інфраструктури до атак недорогими безпілотними апаратами (дронами), які можуть завдати значної шкоди дорогим об'єктам, таким як залізничні або енергетичні системи. Традиційні системи протиповітряної оборони не завжди здатні виявляти та перехоплювати ці дрони через їхню низьку висоту польоту та малий розмір. Відтак, впровадження технології виявлення дронів на основі концепції Інтернету речей (IoT) в інфраструктуру моніторингу стає критично важливим. Ці системи можуть надавати сповіщення в реальному часі [2-3] та відстежувати несанкціоновану активність дронів, допомагаючи захистити життєво важливу залізничну та енергетичну інфраструктуру від потенційних загроз. Вирішуючи цю нову загрозу, залізничні оператори можуть краще захистити свої активи, забезпечуючи безперервну та безпечну роботу своїх мереж.

Мета та завдання дослідження

Метою цієї роботи є дослідження сучасних технологій для систем моніторингу широкого спектру (WAMS) в контексті моніторингу залізничних активів у режимі реального часу. Це включає вивчення використання WAMS для відстеження механічних параметрів повітряних проводів, таких як натяг та знос, для забезпечення надійності та безпеки електрифікованих залізниць. Крім того, робота досліджує інтеграцію децентралізованих та автономних систем ідентифікації дронів.

Методика дослідження

Для реалізації поставленої мети, перш за все, необхідно визначитись зі способом передачі інформації. Першим варіантом передачі є використання технології ZigBee – це технологія бездротового зв'язку, що працює на стандарті IEEE 802.15.4 і в першу чергу розроблена для низькошвидкісних мереж з низьким енергоспоживанням [4], що дозволяє бездротовим пристроям у додатках ZigBee проводити більшу частину часу в енергозберігаючих режимах. Вона працює глобально в діапазонах частот 868 МГц, 915 МГц та 2,4 ГГц, забезпечуючи максимальну швидкість передачі даних до 250 Кбіт/с. Розроблений Zigbee Alliance, він забезпечує безперебійне підключення та зв'язок між пристроями в персональних мережах (PAN), підкреслюючи простоту, надійність та енергоефективність.

Іншим варіантом передачі даних є використання технології LoRa – це технологія радіочастотної модуляції для малопотужної широкосмугової мережі (LPWAN), розроблена Semtech [5]. Вона забезпечує надзвичайно далекі лінії передачі даних, що охоплюють до п'яти кілометрів у міських районах та понад 15 кілометрів у сільській місцевості з прямою видимістю. Винятковою особливістю LoRa є її наднизьке енергоспоживання, що дозволяє пристроям з живленням від батарейок служити до 10 років. Працюючи в зірчастій топології та використовуючи відкритий протокол LoRaWAN, ця технологія ідеально підходить для застосувань, що потребують широкого покриття, глибокого проникнення в будівлі та ефективного збору невеликих обсягів даних з численних малопотужних пристроїв.

Технологія LoRa забезпечує тривалий термін служби батарей пристроїв, мінімізуючи енергію, необхідну для нечастої передачі невеликих пакетів даних. Працюючи на власній модуляції з розширеним спектром, отриманій на основі Chirp Spread Spectrum (CSS), LoRa використовує канали з фіксованою пропускну здатністю 125 кГц або 500 кГц для висхідного каналу та 500 кГц для низхідного каналу.

Основні результати дослідження

На основі аналізу розглянутих технологій авторами запропонована концепція децентралізованої системи вимірювання високої напруги для залізничних повітряних ліній та пристрій з прямим вимірюванням високої напруги та бездротовим зв'язком даних.

Розглянуті технології сенсорних датчиків для децентралізованої системи моніторингу дозволяють контролювати широкий спектр параметрів залізничних повітряних ліній. Розширюючи традиційний моніторинг струму та напруги, запропонована система включає датчики для механічних параметрів, таких як натяг дроту. Вона також дозволяє інтегрувати цифрові мікрофони для виявлення та аналізу звуків, потенційно ідентифікуючи загрози, такі як польоти дронів. Для передачі даних досліджено можливість впровадження недорогої, енергоефективної бездротової технології. Запропонована децентралізована система моніторингу широкого діапазону залізниць використовує ці досліджені технології, застосовуючи ZigBee для збору даних між сусідніми датчиками та LoRa для передачі критичної та узагальненої інформації.

Список використаних джерел

1. Steele C., Roberts J. Railway smart grids: Drivers, benefits and challenges // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409712462858>
2. S. Surma, and J. Lukasik, "Contact network monitoring", Electrification of Transport, vol. 5, 2013, pp. 113–118.
3. M. Mizan, K. Karwowski, and D. Karkosiński "Monitoring Odbieraków Prądu w Warunkach Eksploatacyjnych na Linii Kolejowej", Przegląd Elektrotechniczny, 2013, R89, nr 12, pp. 154- 160.
4. "What is ZigBee and how it works?". [Online]. Available: <https://www.tech-sparks.com/zigbee/>
5. "LoRa and LoRaWAN: A Technical Overview," Semtech Corporation, 26 p., December 2019.

ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ *SOFT OPEN POINTS (SOP)* ПРИ РЕАЛІЗАЦІЇ ДИНАМІЧНОГО КЕРУВАННЯ РЕЖИМАМИ РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖ

Анотація: У роботі розглянуто використання технології *SoftOpenPoint (SOP)* як інструменту підвищення ефективності динамічного керування режимами розподільних електричних мереж (РМ). Обґрунтовано актуальність впровадження SOP у зв'язку зі зростанням частки розподілених відновлюваних джерел енергії та появою мінливих двонаправлених потоків потужності. Запропоновано підхід до керування SOP у режимі реального часу з метою мінімізації втрат електроенергії та з урахуванням невизначеності даних. Показано, що SOP дозволяє наблизити роботу розімкнутих мереж до ефективності замкнених топологій, практично зберігаючи структуру існуючого релейного захисту.

Ключові слова: *SoftOpenPoint*, розподільні мережі, динамічне керування, втрати електроенергії, енергоефективність, оптимізація режимів, розподілені джерела енергії.

Вступ. Зростання частки локальних джерел генерації у розподільних мережах зумовлює появу двонаправлених потоків потужності, що призводять до зростання активних втрат електричної енергії, зміну рівнів напруг, асиметрії фаз та зниження параметрів надійності. Традиційні засоби регулювання, зокрема регулятори напруги з перемиканням під навантаженням та батареї конденсаторів, які широко використовувалися у РМ, не здатні ефективно реагувати на динамічні зміни, викликані зворотними мінливими потоками потужності. Зокрема, вони мають повільну швидкість, обмежений діапазон роботи та не забезпечують безперервного регулювання. Це обумовлює потребу у застосуванні нових підходів з використанням силових електронних пристроїв нового типу, здатних здійснювати гнучкий перерозподіл активної потужності між частинами розподільної мережі та забезпечувати тим самим додаткове зменшення втрати електричної енергії.

Одним із найбільш перспективних технічних рішень для активних РМ є *SoftOpenPoint (SOP)* — керований силовий електронний вузол, який встановлюється замість класичних комутаційних апаратів і забезпечує динамічне і незалежне керування потоками активної та реактивної потужності між суміжними частинами РМ. SOP дозволяє поєднати переваги радіальної та кільцевої конфігурацій розподільних мереж, усуваючи їхні основні недоліки [1–3].

Мета роботи та завдання. Метою роботи є формування підходів до застосування пристроїв *SoftOpenPoint* у задачах динамічного керування режимами розподільних РМ, огляд принципів керування та формування методів й алгоритмів оптимального управління роботою SOP.

Матеріал і результати досліджень

Конструктивно SOP базується на структурі з двома інверторами напруги, об'єднаними за схемою B2B (*Back-to-Back VSC*), які з'єднуються з мережею через індуктивності або трансформатори та використовують загальний конденсатор на шині постійного струму. SOP встановлюються в точках нормального роз'єднання розподільних ліній та забезпечують незалежне управління потоками активної та реактивної потужності [3] і, таким чином, дозволяють поєднати переваги як радіальної (розімкненої), так і петлевої (замкненої) схем побудови РМ. Відповідно, впровадження SOP дозволяє продовжувати використовувати мережі з відкритою топологією, імітуючи їх роботу в закритому режимі [1–4].

У контексті цієї роботи головною метою є зменшення втрат електроенергії, і саме за цим критерієм SOP має найбільшу ефективність. Завдяки здатності до перерозподілу

активної потужності між частинами РМ та компенсації реактивної потужності, SOP забезпечує суттєве зниження втрат, особливо в умовах змінного добового графіка навантажень та локальної генерації. Крім того, важливою перевагою є те, що SOP здатен ефективно взаємодіяти з розподіленими відновлюваними джерелами енергії (ВДЕ). Завдяки своїй структурі та можливостям динамічного регулювання, SOP може згладжувати коливання генерації, викликані нестабільністю сонячної або вітрової енергії, та оптимізувати локальний енергетичний баланс. Це робить використання SOP особливо актуальним для сучасних мереж з високим рівнем децентралізованої генерації [5]. У той же час ефективність такого рішення певним чином залежить від місця розташування відповідного обладнання.

Для визначення оптимального місця встановлення SOP пропонується застосувати метод багатокритеріального прийняття рішень TOPSIS, який дає змогу оцінити та ранжувати можливі варіанти розміщення пристрою за ступенем наближеності до ідеального рішення [6]. Для кожної потенційної точки встановлення формуються ключові критерії оцінки, зокрема: вартість пристрою, втрати електроенергії при його роботі та вплив на режимні параметри мережі. Після нормалізації показників і врахування вагових коефіцієнтів кожного критерію визначається відносна близькість кожної з альтернатив до ідеального рішення, що дозволяє вибрати варіант із максимальним значенням цього показника.

Кількісна оцінка переваг SOP є важливим інструментом для їх впровадження, наприклад, вона може бути використана як цільова функція в оптимізаційних задачах для оптимального управління SOP в розподільних мережах. Існують різні пропозиції щодо кількісної оцінки переваг SOP. Наприклад, в [7] повний потік потужності використовується для визначення індексу використання лінії (FLB - feeder load balancing).

Оптимальне керування SOP описується нелінійною задачею мінімізації втрат потужності при дотриманні обмежень на струми, напруги та допустимі межі перетоків потужності [8]. Через нелінійність рівнянь і наявність невизначеності в навантаженнях і генерації задача розв'язується методами нелінійного програмування або метаевристичними алгоритмами (наприклад, рою частинок, генетичним тощо) [9].

Водночас повне урахування стохастичності потребує аналізу великої кількості сценаріїв, що ускладнює обчислення. Тому з'являється необхідність у формуванні спрощеного підходу — керування SOP у режимі реального часу на основі поточних вимірювань параметрів навантаження та рівнів генерації у вузлах РМ. Такий підхід не потребує складного прогнозування режимів і дозволяє ефективно мінімізувати поточні втрати потужності при обмеженому інформаційному забезпеченні.

За даними попередніх досліджень, впровадження SOP у розподільних мережах може знизити активні втрати електроенергії орієнтовно на 10 - 15% залежно від структури мережі, режимів навантаження та місця встановлення [2, 10]. Таким чином, впровадження SOP із відповідним алгоритмом керування створює передумови для значного підвищення енергоефективності РМ за рахунок зменшення втрат, покращення профілю напруг та підвищення гнучкості керування.

Висновки

Використання пристроїв SoftOpenPoint у розподільних мережах дозволяє реалізувати динамічне практично необмежене керування потоками потужності без механічних комутацій, що забезпечує зниження втрат електроенергії та підвищення стабільності роботи мережі. Крім цього, SOP сприяє покращенню профілю напруг, зменшенню фазної асиметрії, підвищенню надійності та гнучкості керування режимами. Застосування методу багатокритеріального прийняття рішень TOPSIS забезпечує структурований і прозорий підхід до вибору місця встановлення SOP, сприяючи одночасно мінімізації вартості обладнання силової електроніки, втрат електроенергії, підвищенню енергоефективності та надійності розподільних мереж. Подальші дослідження доцільно спрямувати на розробку алгоритмів двоетапного адаптивного керування SOP у реальному часі з урахуванням прогнозів навантаження і генерації ВДЕ, а також на оцінку узгодженого сумісного використання SOP із установками зберігання енергії.

Список літератури

1. Жаркін А.Ф., Палачов І.С., Попов В.А. *Підвищення ефективності динамічного керування режимами розподільних мереж*. Праці ІЕД НАН України, 2025.
2. Bloemink J.M., Green T.C. *Benefit of Distribution-Level Power Electronics for Supporting Distributed Generation Growth*. IEEE Trans. Power Deliv., 2013.
3. Cao W., Wu J., Jenkins N., Wang C., Green T. *Operating Principle of Soft Open Points for Electrical Distribution Network Operation*. Appl. Energy, 2016.
4. Fuad K.S. et al. *Soft Open Point in Distribution Networks*. IEEE Access, 2020.
5. Bloemink JM, Green TC. Increasing distributed generation penetration using soft normally-open points. In: IEEE power and energy society general meeting; 2010. p. 1-8.
6. Chen, C.-T. (2000). Extension of the TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment. Fuzzy Sets and Systems, 114(1), 1–9. [https://doi.org/10.1016/S0165-0114\(97\)00377-1](https://doi.org/10.1016/S0165-0114(97)00377-1)
7. Q. Qi, C. Long, J. Wu, and J. Yu, "Impacts of a medium voltage direct current link on the performance of electrical distribution networks," Applied Energy, 2018, vol. 230, pp. 175–188.]
8. Sarantakos I. et al. *A Robust Mixed-Integer Convex Model for Optimal Scheduling of Integrated Energy Storage–Soft Open Point Devices*. IEEE Trans. Smart Grid, 2022.
9. Loboda Y., Slobodyan R. *Застосування Soft Open Point для оптимізації втрат електроенергії в розподільних електричних мережах*. Herald of Khmelnytskyi National University, 2024.
10. Attanasio F. et al. *Low Voltage Soft Open Point with Energy Storage: System Simulation and Prototype Preliminary Test Results*. Proc. SPEEDAM, 2018.

ЕКОНОМІЧНИЙ ОГЛЯД ТА ПОТЕНЦІЙНА РОЛЬ ТЕХНОЛОГІЇ VEHICLE-TO-LOAD (V2L) В ЗАБЕЗПЕЧЕННІ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СТІЙКОСТІ УКРАЇНИ

Вступ. Енергетична система України функціонує в умовах безпрецедентних викликів, пов'язаних із цілеспрямованими атаками на генеруючі потужності та розподільчі мережі. Водночас, автомобільний ринок демонструє динамічний ріст у сегменті електромобілів (EV), парк яких стає значущим енергетичним ресурсом. У цьому контексті технологія Vehicle-to-Load (V2L), що дозволяє використовувати акумуляторну батарею EV як автономне джерело змінного струму, перетворює електромобіль з транспортної функції на інструмент підвищення енергетичної стійкості. На відміну від технології Vehicle-to-Grid (V2G), яка вимагає складної двосторонньої взаємодії з мережею та значних регуляторних змін, V2L є вже доступним рішенням для забезпечення локальної енергетичної автономності розподілених електромереж [1].

Метою роботи є кількісна та якісна оцінка економічної моделі імплементації V2L для ключових груп: кінцевих користувачів (власників EV) та оператора енергосистеми.

Матеріали та результати. При аналізі технологій двонаправленої зарядки важливо розмежовувати Vehicle-to-Load та Vehicle-to-Grid. Сутність V2G полягає у віддачі електроенергії з батареї електромобіля напряму в загальну мережу для її підтримки [2]. Однак, в Україні наразі відсутня необхідна нормативно-правова база для повноцінного функціонування V2G [3].

На цьому тлі V2L є раціональним та стратегічно виправданим рішенням. V2L функціонує за рахунок бортового інвертора EV, що перетворює постійний струм (DC) високовольтної батареї на стандартизований змінний струм (230 В /50 Гц). Ця технологія повністю відповідає інтересам споживача: підвищення енергетичної автономії та можливість економії. Власник електромобіля зберігає абсолютний контроль над своєю енергією [4].

Кількість енергії, яку може віддати електромобіль, розраховується за наступною формулою:

$$E_{available} = C \times (SOC_{start} - SOC_{end}), \quad (1)$$

де $E_{available}$ – доступна енергія для віддачі, кВт·год; C – корисна (використовувана) ємність батареї, в кВт·год. Це фактична ємність, яку дозволяє використовувати система керування батареєю (BMS), і вона може бути за необхідності зменшена користувачем; SOC_{start} – початковий рівень заряду; SOC_{end} – кінцевий рівень заряду, який потрібно залишити в батареї.

У таблиці 1 наведено розрахунки доступної для резервного живлення енергії для поширених в Україні моделей, згрупованих за ємністю батареї. Розрахунки наведені за умови розряджання батареї електромобіля з 90% до максимум 30%. Час розраховано виходячи з умовного середньодобового споживання українського домогосподарства у 5 кВт·год.

Таблиця 1

Модель електромобіля	Корисна ємність батареї, кВт·год	Доступна енергія для віддачі, кВт·год	Час живлення домогос-тва
Hyundai Ioniq 5	54	32.4	~ 6.5 днів
Hyundai Ioniq 6	53	31.8	~ 6.3 днів
Kia EV6 (Standard Range)	54	32.4	~ 6.5 днів
MG 4 (Standard Range)	50.8	30.5	~ 6 днів
Nissan Leaf e+	59	35.4	~ 7 днів
Volkswagen ID.4 (52 kWh)	52	31.2	~ 6.2 днів

Економічний ефект V2L для кінцевого користувача є непрямим і формується за рахунок уникнення витрат та збитків. Чиста економічна вигода (B_{V2L}) може бути змодельована наступним рівнянням [5]:

$$B_{V2L} = \sum_{i=1}^n ((C_{gen_i} + C_{fuel_i}) + L_{dtime_i}) - C_{V2L}, \quad (2)$$

де i – індекс i -го випадку відключення електроенергії протягом розрахункового періоду;

C_{gen_i} – амортизована вартість альтернативного джерела живлення (генератора), яке не було придбано;

C_{fuel_i} – вартість пального та обслуговування для генератора;

L_{dtime_i} – вартість збитків від простою, що розраховується як $L_{dtime} = H_i \times W$, де H_i – тривалість простою, W – вартість години роботи або умовна вартість втраченого комфорту;

C_{V2L} – вартість втрат на перетворення енергії V2L.

Для бізнесу переваги забезпечення безперервності операційної діяльності є важливим для збереження ВВП, робочих місць та податкових надходжень [6]. V2L мінімізує економічні збитки від руйнування виробничих та сервісних ланцюгів.

Хоча V2L не взаємодіє з мережею, для операторів мереж воно опосередковано підвищує її надійність. Шляхом "згладжування" пускових струмів після відновлення централізованого живлення, V2L знижує ризик вторинних аварій та дозволяє більш стабільно вводити мережу в робочий режим [7].

Також, надлишок енергії, спожитий вночі, використовується в час високого попиту або аварії, розвантажуючи локальну мережу.

Висновки. Технологія Vehicle-to-Load є ефективним та економічно обґрунтованим рішенням для підвищення енергетичної стійкості на рівні розподіленої мережі. Економічна модель V2L, що базується на уникненні збитків, демонструє значну вигоду для власників електромобілів. Аналіз підтверджує, що V2L є потенційно важливим елементом децентралізованої енергетичної інфраструктури України. Подальше стимулювання та популяризація цієї технології, може суттєво прискорити адаптацію власників електромобілів до цієї технології та посилити стабільність енергопостачання на локальному рівні.

Список літератури

1. [National Institute of Technology Goa and G. Kumar, "Critical Review of Vehicle-to-Everything (V2X) Topologies: Communication, Power Flow Characteristics, Challenges, and Opportunities," *CPSS TPEA*, vol. 9, no. 1, Mar. 2024, doi: 10.24295/CPSS TPEA.2023.00042.
2. F. Yang, D. Zhang, T. Shimotori, K.-C. Wang, and Y. Huang, "Study of transformer-based power management system and its performance optimization for microbial fuel cells," *Journal of Power Sources*, vol. 205, pp. 86–92, May 2012, doi: 10.1016/j.jpowsour.2012.01.025.
3. Zaporozhets, A., Kostenko, G., Zgurovets, O, "Preconditions and Main Features of Electric Vehicles Application for Frequency Regulation in the Power System," presented at the 3rd International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems (ITTAP 2023). CEUR Workshop Proceedings, 2023, pp. 43–54. [Online]. Available: <https://ceur-ws.org/Vol-3628/paper4.pdf>
4. D. B. Richardson, "Electric vehicles and the electric grid: A review of modeling approaches, Impacts, and renewable energy integration," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 19, pp. 247–254, Mar. 2013, doi: 10.1016/j.rser.2012.11.042.
5. K. Chung and J.-H. Ryu, "Economic Value Assessment of Vehicle-to-Home (V2H) Operation under Various Environmental Conditions," *Energies*, vol. 17, no. 15, p. 3828, Aug. 2024, doi: 10.3390/en17153828.
6. D. W. Caves, J. A. Herriges, and R. J. Windle, "The Cost of Electric Power Interruptions in the Industrial Sector: Estimates Derived from Interruptible Service Programs," *Land Economics*, vol. 68, no. 1, p. 49, Feb. 1992, doi: 10.2307/3146742.
7. C. Saeseiw, K. Pongpri, T. Kaewchum, S. Somkun, and P. Pachanapan, "Power Management for V2G and V2H Operation Modes in Single-Phase PV/BES/EV Hybrid Energy System," *WEVJ*, vol. 16, no. 10, p. 580, Oct. 2025, doi: 10.3390/wevj16100580.

SYSTEM OF KEY PERFORMANCE INDICATORS FOR INTEGRATED EVALUATION OF SECOND-LIFE EV BATTERY DEPLOYMENT IN ENERGY SYSTEMS

Introduction. The growing electrification of transport and the expansion of renewable energy sources have led to rapid structural changes in modern energy systems [1]. These changes require not only new technologies for flexibility and storage but also new metrics for evaluating their performance across technical, economic, and environmental dimensions. In this context, second-life electric vehicle batteries (SLBs) - repurposed lithium-ion batteries after their automotive use - are emerging as a promising resource for grid-scale and distributed energy storage applications. Their deployment supports circular economy objectives by extending the useful life of materials, reducing waste, and decreasing the carbon footprint of battery manufacturing.

However, current evaluation methods for second-life battery applications are fragmented and lack a unified system of indicators [2]. Technical studies often focus on degradation, remaining useful life, or energy efficiency, while economic analyses emphasize cost, profitability, or levelized metrics. Environmental assessments typically use life-cycle approaches but are rarely linked to operational data. This fragmentation hinders decision-making, planning, and policy development.

The purpose of this work is to develop a system of Key Performance Indicators (KPIs) for integrated evaluation of second-life EV battery deployment within energy systems. The proposed KPI framework combines measurable parameters, providing a transparent basis for comparing application scenarios and guiding adaptive control of battery operation.

Materials and Methods

The proposed KPI framework is based on a **multi-model structure**, where each model provides a subset of indicators linked through data exchange flows (Fig. 1).

Environmental & Circular (EC)	Energy & Safety (ES)	Economic & Lifecycle (EL)
EC1. Carbon Footprint Reduction (CFR)	ES1. State of Health (SoH)	EL1. Levelized Cost of Storage (LCOS)
EC2. Material Efficiency (ME)	ES2. Remaining Useful Life (RUL)	EL2. Total Cost of Ownership (TCO)
EC3. Energy Payback Time (EPBT)	ES3. State of Safety (SoS)	EL3. Amortization Period (AMP)
EC4. Circularity Index (CI)	ES4. Thermal Stability Index (TSI)	EL4. Internal Rate of Return (IRR)
EC5. Battery Regulation Compliance Rate (RCR)	ES5. Operational Flexibility Score (OFS)	EL5. Cost Ratio to New Battery
		EL6. Cost Ratio to Recycling
		EL7. Supply Chain Risk Index

Figure 1 - Conceptual KPI Framework for Integrated Evaluation of Second-Life EV Battery Deployment in Energy Systems

Within this structure, three core domains of indicators are distinguished. Technical KPIs describe the operational behavior of the batteries, including their reliability, energy efficiency, and degradation dynamics. Economic KPIs quantify lifecycle costs, investment returns, and utilization

efficiency, reflecting how performance translates into financial viability. Environmental KPIs capture avoided emissions and material reuse effects, connecting operational efficiency to broader sustainability goals. All indicators are expressed relative to a reference new battery to highlight the specific benefits and limitations of second-life applications. Tab. 1 details the representative KPIs corresponding to the three domains presented in Figure 1.

Table 1 - Main Key Performance Indicators for second-life EV battery evaluation

Domain	Indicator (Code)	Purpose / Interpretation
Environmental & Circular (EC)	EC ₁ Carbon Footprint Reduction (CFR)	Avoided GHG emissions due to reuse instead of new production
	EC ₂ Material Efficiency (ME)	Share of materials retained in the circular loop
	EC ₃ Energy Payback Time (EPBT)	Time required for system to recover invested energy
	EC ₄ Circularity Index (CI)	Overall contribution to circular economy
	EC ₅ Regulatory Compliance Rate (RCR)	Degree of conformity with EU Battery Regulation 2023/1542
Energy & Safety (ES)	ES ₁ State of Health (SoH)	Capacity retention reflecting degradation level
	ES ₂ Remaining Useful Life (RUL)	Expected operating time or cycles before end-of-life
	ES ₃ State of Safety (SoS)	Compliance with operational safety criteria
	ES ₄ Thermal Stability Index (TSI)	Sensitivity of battery temperature to load variations
	ES ₅ Operational Flexibility Score (OFS)	Ability to support frequency and demand response
Economic & Lifecycle (EL)	EL ₁ Levelized Cost of Storage (LCOS)	Cost per kWh of delivered energy
	EL ₂ Total Cost of Ownership (TCO)	Full economic burden for operator
	EL ₃ Amortization Period (AMP)	Payback horizon
	EL ₄ Internal Rate of Return (IRR)	Economic profitability indicator
	EL ₅ Cost Ratio to New Battery (CRN)	Relative investment advantage of SLB
	EL ₆ Cost Ratio to Recycling (CRR)	Cost comparison of reuse vs recycling pathway
	EL ₇ Supply Chain Risk Index (SCRI)	Exposure to resource and transport disruptions

The KPI system reflects the interdependence between technical degradation and economic performance. Higher depth of discharge or elevated temperature accelerates aging, increasing the Integral Degradation Index and the LCOS. In contrast, optimized operation within moderate DOD ranges (30-70%) mitigates wear, prolongs the RUL, and simultaneously lowers LCOS and the carbon footprint through extended service duration. This integrated relationship enables adaptive management, where KPIs function as real-time triggers for operational adjustments - for example, shifting a battery module from primary frequency regulation to reserve mode once its State of Health declines below 80%. Beyond operational control, the KPI framework provides a consistent basis for benchmarking across projects, technologies, and market environments. It supports standardized reporting for performance comparison and aligns with the emerging EU Battery Regulation 2023/1542, ensuring compatibility with sustainability criteria, traceability requirements, and future battery passport systems.

Conclusions. A unified system of KPIs has been developed to enable integrated evaluation of second-life EV battery deployment within energy systems. The framework connects technical, economic, and environmental dimensions through measurable and comparable indicators, capturing both degradation processes and lifecycle economics. This integrated approach provides a coherent analytical basis for decision-making across planning, operational, and policy levels, ensuring that performance assessment reflects real system dynamics and sustainability objectives.

References:

1. Kostenko, G.P. (2023) Situation analysis of electric transport development prospects and its integration into Ukrainian power system. *Power Eng. Econ. Tech. Ecol.* 2023, 1, 71. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.1.2023.276185>
2. Kostenko, G., & Zaporozhets, A. (2025). Trigger-Based PDCA Framework for Sustainable Grid Integration of Second-Life EV Batteries. *World Electric Vehicle Journal*, 16(10), 584. <https://doi.org/10.3390/wevj16100584>

ASSESSING THE RESILIENCE OF LOCAL POWER SYSTEMS IN UKRAINE USING A COMBINED HEAT AND POWER APPROACH

Traditional techno-economic optimization models for local power system (LPS) and district heating systems (DHS) demonstrate limited applicability under crisis conditions, such as those induced by military aggression or severe infrastructure failures. Their objective functions, typically centered on cost minimization or profit maximization under deterministic assumptions, fail to adequately capture the non-linear dynamics and stochastic nature of system resilience. This creates a critical research gap: the absence of a methodology that quantitatively integrates a dynamic resilience criterion into the optimization framework. This work proposes such a method, designed to shift the planning paradigm from reactive recovery to proactive, resilience-oriented investment. [1-3]

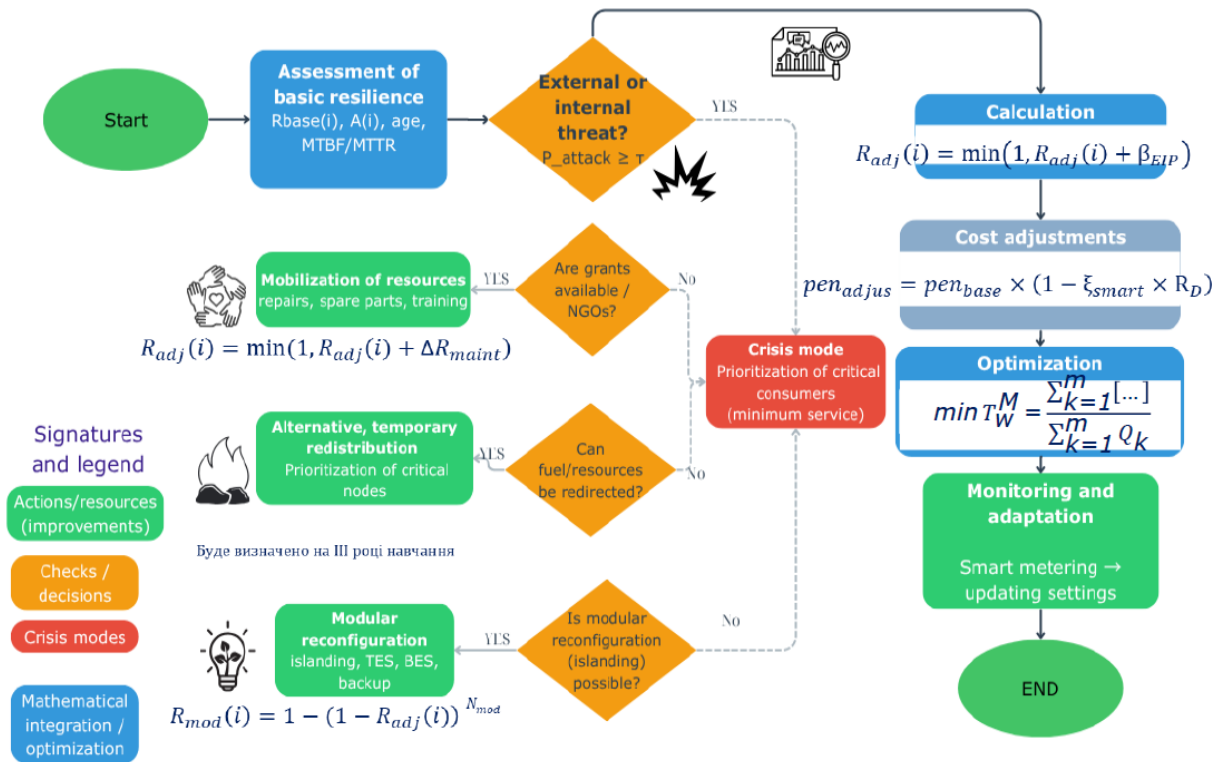


Figure 1 - Algorithm for response and resilience integration in the optimization of a local energy system.

The proposed method operates through a multi-stage process: (1) Basic resilience assessment — evaluation of initial parameters for each generation unit, operational costs and equipment age; (2) Threat identification — activation of the emergency protocol; (3) Resilience enhancement cascade comprising three conditional pathways: (a) mobilisation of resources, including preventive maintenance and replenishment of spare parts; (b) alternative redistribution, including reallocation of fuel or personnel to prioritised critical nodes; and (c) modular reconfiguration, including activation of islanding, TES and BES units to ensure redundancy. If no enhancement path is available, crisis mode ensures minimal service for critical consumers. The final stages involve mathematical integration and optimisation, adjusting costs and penalties, and monitoring and adaptation, where smart metering data dynamically update model parameters under changing operational or emergency conditions. [2-5].

Conclusions

The developed methodology provides a robust decision-support tool for policymakers, investors, and system operators. It enables a quantitative, scenario-based evaluation of modernization strategies, prioritizing investments that ensure both economic viability and high resilience in crisis conditions. This approach facilitates a shift from cost-based planning to a more holistic, robust optimization paradigm, which is critical for the sustainable and secure reconstruction of Ukraine's local energy systems.

References

1. Priedniece, V., Pakere, I., Krigers, G., & Blumberga, D. (2024). Towards a Unified Framework for District Heating Resilience. *Environmental and Climate Technologies*, 28(1), 566-579.
2. Khodakivskyi, V., Karpenko, D., Bilous, I., & Savickas, R. (2025). Ensuring Energy Security in Ukraine: The Role of Cogeneration and Sustainable Funding for District Heating Systems. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 27, 196-210.
3. Karpenko, D., Deshko, V., Eutukhova, T., Novoseltsev, O., Teslenko, O. (2025). Analysis of the Market Aspects in the Reform of District Heating Systems Under Wartime and Post-war Recovery Conditions. In: *Systems, Decision and Control in Energy VII*. Springer.
4. Semenenko, O., Kuravskyi, V., Kliat, Yu., Cherniavskyi, R., & Chernyshova, I. (2025). Energy security as a key factor in Ukrainian economic resilience in the time of war. *Scientific Bulletin of Mukachevo State University. Series "Economics"*, 12(1), 118-133.
5. Lepiksaar, K., Mašatin, V., Latõšov, E., Siirde, A., & Volkova, A. (2021). Improving CHP flexibility by integrating thermal energy storage and power-to-heat technologies into the energy system. *Smart Energy*, 2, 100022.

ОБҐРУНТУВАННЯ УДОСКОНАЛЕНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ РЕГУЛЮВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯ

Вступ. Мікромережі розглядаються як один з ключових напрямів модернізації розподільчих мереж, здатним забезпечувати автономність, надійність та підвищену гнучкість. Одним із головних викликів для мікромереж є регулювання навантаження для забезпечення стійкості як в паралельному, так і в острівному режимах роботи.

Важливим напрямом розвитку розумних мереж є управління попитом (Demand Side Management, DSM), що передбачає гнучке керування обсягом та графіком споживання за рахунок зміщення, обмеження або пріоритезації навантажень [1].

Ефективність регулювання навантаження та реалізації заходів DSM безпосередньо визначається можливостями комунікаційної інфраструктури, що поєднує систему енергоменеджменту з користувачами мікромережі.

У цьому контексті Power Line Communication (PLC) постає як перспективна технологія: вона вже успішно застосовується в системах смарт-метрингу [2], дозволяючи використовувати наявну електричну інфраструктуру для передачі даних.

Мета роботи. Обґрунтувати вдосконалену технологію регулювання навантаження в мікромережах на основі поєднання алгоритмів управління попитом та використання технології Power Line Communication як доступного й масштабованого каналу двостороннього зв'язку.

Вимоги до системи комунікації. Система зв'язку в мікромережі, яка підтримує заходи DSM, має задовольняти кілька критичних вимог: забезпечувати якість обслуговування (QoS) з низькими затримками та високою надійністю [3], бути сумісною з різними пристроями та стандартами [4], мати властивість масштабування для підтримки великої кількості вузлів без втрати продуктивності, та гарантувати безпеку через механізми аутентифікації, шифрування та захист від атак [5].

Напрями розвитку та застосування PLC. Технологія розвивається у двох основних напрямках: вузькосмугова та широкосмугова, які орієнтуються на різні класи задач. Вузькосмугова PLC (Narrowband, NB-PLC) є одним з ключових елементів комунікаційної інфраструктури розумних енергетичних мереж. Найбільш масштабним прикладом застосування є проєкт Advanced Metering Infrastructure (AMI): зокрема в Європі реалізовано розгортання понад 30 млн лічильників на базі G3-PLC стандарту [2]. Крім того, PLC знаходить застосування у керуванні вуличним освітленням та системах «розумного міста» [1]. Широкасмугова PLC (Broadband, BB-PLC) застосовується в домашніх і офісних мережах для передачі мультимедіального контенту, доступ до інтернету (in-home BB PLC), а також комунікація між зарядними станціями та електромобілями [6].

Економічний аспект. Вартість PLC-рішень складно оцінити окремо, оскільки комунікаційний модуль зазвичай є частиною готового продукту і виділити його ціну проблематично. Окремі модеми, зокрема PL360B (Microchip) та SM2400 (Semitech), коштують близько 5–8 USD у промислових партіях [7]. Водночас на ринку вже доступні готові рішення, інтегровані з PLC стандартами, зокрема однофазний лічильник HXP100DII, за близько 58 USD [8] з функціями AMI та дистанційного відключення навантаження. Його версія без PLC коштує на 34 USD дешевше що дозволяє вважати цю різницю орієнтованою вартістю інтегрованого PLC-модуля. Доступність таких компонентів підтверджує доцільність застосування PLC-модулів в мікромережах.

Таблиця 1. Порівняння характеристик NB-PLC та BB-PLC.

Критерій	Вузкосмуговий PLC	Широкосмуговий PLC
Діапазон частот	3–500 кГц (ДСТУ EN 50065-1:2014 3 – 148.5 кГц).	1.6–250 МГц [1] (ДСТУ EN 50561-1:2014 1.6 – 30 МГц).
Пропускна здатність	Низька/Середня. До 1 Мбіт/с (PHY layer). Типово 10–500 кбіт/с [1].	Висока. До 2 Гбіт/с (PHY layer)[1]. Типово десятки/сотні Мбіт/с.
Дальність зв'язку	Велика дальність. кілометри у НН/СН мережах. Проходить СН/НН трансформатори.	Низька дальність. до кількох сотень метрів. Зазвичай потребує обхідних ланцюгів.
Якість обслуговування	Висока надійність. Виправлення помилок, повторення коду. Низька затримка. Відповідає вимогам керування (<100 мс).	Висока надійність. Виправлення помилок, повторення коду. Працює в умовах імпульсного шуму. Низька/Середня затримка.
Сумісність	Висока. Стандарти PRIME, G3-PLC, IEEE 1901.2. Гібридні профілі PLC & RF.	Висока. Стандарти IEEE 1901-2010 (включає HomePlug та HD-PLC).
Масштабованість	Висока. меш-маршрутизація для великих мереж (400+ вузлів).	Висока. Підходить для розширення мереж.
Безпека	Висока. Фізичний контакт для доступу. AES-128 шифрування.	Висока. AES-128 шифрування. Більш вразлива до шумових атак.

Новизна. Запропоноване рішення поєднує необхідність двосторонньої комунікації в мікромережі з доступністю PLC модулів, що гарантує моніторинг та керування навантаженнями для підвищення стійкості та реалізації заходів DSM. Перевага PLC в простоті інтеграції дозволить категоризувати навантаження користувачів мікромережі на критичні, керовані (мікромережею), цінозалежні(визначені користувачем) та термічні навантаження. Система енергетичного менеджменту та користувач мікромережі отримають можливість керувати навантаженнями в залежності від визначених політик та забезпечення стійкості мікромережі.

Очікувані результати. Використання удосконаленої технології на основі DSM та PLC дозволить підвищити самоспоживання та ефективність шляхом автоматизованої синхронізації локальної генерації і споживання. Очікується зменшення пікових навантажень за рахунок впровадження заходів управління попитом (наприклад, зміщення певних категорій навантаження), що підвищить стійкість роботи мікромережі. Додатково категоризація навантажень дозволить зменшити негативні прояви острівного режиму через перенесення відключень з рівня користувачів мікромережі на рівень окремих категорій навантажень. Застосування масштабованих PLC-модулів знизить витрати на створення комунікаційної інфраструктури.

Висновки. Запропонована технологія регулювання навантаження в мікромережах дозволяє одночасно забезпечити стійкість та впровадження управління попитом, що забезпечує використання наявної електричної інфраструктури як комунікаційної основи. Це відкриває можливості для практичного впровадження гнучких стратегій DSM без значних додаткових витрат.

Список використаних літератури

1. I. R. S. Casella and A. Anpalagan, Power Line Communication Systems for Smart Grids, 2nd ed. The IET, 2024. <https://doi.org/10.1049/PBPO260E>
2. Lavenu, C.; Chauvenet, C.; Treffiletti, P.; Varesio, M.; Hueske, K. Standardization Challenges, Opportunities and Recent Evolutions for the G3-PLC Technology. *Energies* 2021, 14, 1937. <https://doi.org/10.3390/en14071937>
3. Kovtun, S., Ponomarenko, O., & Nazarenko, O. (2023). Quality of the Information Flow Management at Stochastic Energy Consumption Conditions. *System Research in Energy*, (3 (74), 78-84. <https://doi.org/10.15407/srenergy2023.03.078>

4. Aghmadi, A.; Hussein, H.; Polara, K.H.; Mohammed, O. A Comprehensive Review of Architecture, Communication, and Cybersecurity in Networked Microgrid Systems. *Inventions* 2023, 8, 84. <https://doi.org/10.3390/inventions8040084>
5. Ayele, E.D.; Gonzalez, J.F.; Teeuw, W.B. Enhancing Cybersecurity in Distributed Microgrids: A Review of Communication Protocols and Standards. *Sensors* 2024, 24, 854. <https://doi.org/10.3390/s24030854>
6. Derek C. Neal, Dan J. Rogers, Malcolm McCulloch, A techno-economic analysis of communication in low-voltage islanded microgrids: Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 209, 2025, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115031>.
7. Microchip Technology Inc., “PL360B – Narrowband PLC Transceiver.” [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://www.microchip.com/en-us/product/pl360b>
8. Konta Energy Solutions, “HXP100DII – Single Phase Smart Meter with G3-PLC.” [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://konta.co.za/product/hxp100dii/>

Могилат М.Ю., магістрент,
Ткаченко В.В., канд. техн. наук, доц.,
Яценко Д.В., д-р філос., асист.,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна

ОПТИМІЗАЦІЯ РОБОТИ ГІБРИДНОЇ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ ДЛЯ ПРИВАТНОГО БУДИНКУ У ПРОГРАМНОМУ СЕРЕДОВИЩІ PVSYST

Вступ: Для підвищення ефективності гібридної сонячної електростанції (СЕС) приватного будинку в м. Чернівці проведено поетапне моделювання у програмному середовищі PVsyst (версія 8.0.18) [1]. Аналіз охоплює три блоки сценаріїв: вибір типу фотоелектричних модулів, визначення оптимального кута нахилу панелей та оцінку впливу експлуатаційних втрат від забруднення поверхні. Розрахунки виконано з використанням кліматичних даних бази *Meteonorm* для м. Чернівці та єдиного профілю навантаження споживача. **Метою дослідження** є визначення оптимальної конфігурації гібридної сонячної електростанції, яка забезпечує максимальну енергетичну ефективність і мінімальні питомі витрати на виробництво електроенергії за умов реальної експлуатації.

Матеріал і результати дослідження

На першому етапі дослідження здійснено вибір двох найбільш доцільних типів фотоелектричних модулів для подальшого порівняльного аналізу у програмному середовищі PVsyst. У табл. 1 наведено результати порівняння всіх технологічних характеристик сонячних панелей [2].

Таблиця 1 – Порівняння технологій сонячних панелей

Технологія	Ефективність модуля, %	Температурний коефіцієнт потужності	Доступність в Україні (ринок 2024–2025)	Підсумок для проєкту
Mono-Si	13.5–19.1	–0.50...–0.38	Дуже висока: JA, Trina, Jinko, Longi та ін.	Оптимально при обмеженій площі; найкраще співвідношення ціна–ефективність
Poly-Si	≈13.1	–0.50...–0.43	Скорочується (ринок переходить на mono)	Нижча щільність потужності; менш доцільно, ніж mono-Si
HJT (Si-HJT)	16.7	–0.30	Середня: поодинокі серії	Кращий темп-коєф.; ціна вища — рішення залежить від бюджету
a-Si	6.31	–0.23	Дуже низька	Низька ефективність; недоцільно при дефіциті площі
CdTe	6.94–10.07	–0.25	Обмежено (здебільшого для великих станцій)	Добра термостійкість; обмежена доступність/інтеграція
CIGS	11.17	–0.38	Низька (поодинокі постачання)	Потенціал є, але нерівномірна деградація й доступність

Після проведеного аналізу для подальшого порівняння були обрані монокристалічні модулі та полікристалічні панелі. У табл. 2 наведено результат їх порівняння.

Таблиця 2 – Порівняння монокристалічних і полікристалічних панелей

Показник	Mono-Si	Poly-Si
Потужність одного модуля, Вт	610	350
Кількість модулів, шт	18	30
Загальна потужність масиву, кВт _p	10.98	10.50

Продовження табл. 2

Ефективність модуля, %	22.63%	17.23%
Площа модулів, м²	48.6	61
Річна генерація, кВт·год	13 317	12 507
Питома генерація, кВт·год/кВт _р ·рік	1 213	1 191
Коефіцієнт продуктивності (PR), %	85.12	83.59
Solar Fraction (SF), %	84.59	84.29
Вартість системи, \$	6 184	7 050
LCOE, \$/кВт·год	0.118	0.0876
Період окупності, роки	5.1	5.9

На основі отриманих параметрів сформовано базову конфігурацію гібридної сонячної електростанції з монокристалічними панелями *Longi Solar* інвертором та акумуляторною батареєю.

В табл. 3 представлено сценарії, що належать до другого блоку — вплив кута нахилу фотоелектричних модулів на ефективність роботи гібридної сонячної електростанції.

Таблиця 3 - Результати моделювання залежно від кута нахилу

Кут нахилу, °	Річна генерація, кВт·год	Питома генерація, кВт·год/кВт _р ·рік	PR, %	SF, %	LCOE, \$/кВт·год	Окупність, р.
30°	13 237	1 206	84.91	84.95	0.1189	5.2
35°	13 317	1 213	85.03	84.79	0.1181	5.1
40°	13 317	1 213	85.12	84.59	0.1180	5.1

За результатами моделювання найвищі показники питомої генерації коефіцієнта продуктивності досягнуто при куті нахилу 40°. Економічні показники при цьому залишаються найкращими — LCOE $\approx$ 0.118 \$/кВт·год, термін окупності $\approx$ 5,1 року. Таким чином, оптимальним кутом нахилу фотоелектричних модулів для умов м. Чернівці є 40°.

В табл. 4 показано сценарії, що належать до третього блоку — вплив експлуатаційних втрат від забруднення поверхні модулів на ефективність роботи СЕС.

Таблиця 4 - Вплив рівня забруднення модулів на генерацію електроенергії

Рівень soiling, %	Річна генерація, кВт·год	Питома генерація, кВт·год/кВт _р ·рік	PR, %	Solar Fraction (SF), %	LCOE, \$/кВт·год	Окупність, р.
1 %	13 185	1201	84.27	84.51	0.119	5.2 р.
2 %	13 053	1189	83.43	84.42	0.120	5.3 р.
3 %	12 983	1183	83.00	84.10	0.121	5.4 р.

Зі збільшенням рівня забруднення поверхні модулів від 1 % до 3 % спостерігається поступове зниження річної та питомої генерації приблизно на 1.5 %, а також помірне зменшення коефіцієнта PR. Це призводить до зростання собівартості виробленої енергії (LCOE) та подовження терміну окупності системи приблизно на 0.2 року.

Висновки: Проведене моделювання підтвердило, що монокристалічні модулі забезпечують найкращі енергетичні показники та короткий період окупності порівняно з полікристалічними аналогами. Оптимальний кут нахилу для умов м. Чернівці становить 40°, при якому досягається найвищий коефіцієнт продуктивності (PR $\approx$ 85 %) та мінімальне значення LCOE ($\approx$ 0.118 \$/кВт·год). Вплив експлуатаційних втрат показав необхідність регулярного очищення модулів для збереження ефективності системи.

Список використаних літератури

1. PVsyst 8 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.pvsyst.com/en/products/pvsyst-8/>.
2. Aïssa B., Tabet N. (ред.). Photovoltaic Technology for Hot and Arid Environments. – London: The Institution of Engineering and Technology, 2023. – 312 с. – ISBN 978-1-78561-911-3 (hardback); 978-1-78561-912-0 (PDF).

СИСТЕМИ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ (BESS) ЯК ІНСТРУМЕНТ ОПТИМІЗАЦІЇ РЕЖИМІВ РОБОТИ МЕРЕЖІ 0,4 кВ

Анотація. Метою дослідження є оцінка впливу систем накопичення енергії (BESS) на оптимізацію режимів роботи розподільчих мереж 0,4 кВ за ключовими технічними критеріями: зниженням втрат активної енергії, стабільністю напруги, симетрією фаз, обмеженням пікових навантажень та підвищенням ефективності використання енергії від відновлюваних джерел. Методика реалізації ґрунтується на порівняльному аналізі показників у режимах «до / після впровадження BESS», а також імітаційному моделюванні потоків енергії у вузлі мережі 0,4 кВ, що включає фотоелектричну генерацію (PV), навантаження типу prosumer, систему керування енергією (EMS) та алгоритми адаптивного керування зарядом/розрядом BESS залежно від профілю споживання й стану мережі. Додатково враховано вплив BESS на балансування фаз та обмеження перевантажень у пікові години. Результати моделювання підтверджують, що впровадження BESS забезпечує зниження втрат активної енергії на 8–12 %, обмеження пікових струмів до 20 %, утримання напруги в нормативному діапазоні ± 10 %, зменшення несиметрії фаз на 10–12 % та підвищення самоспоживання електроенергії власної PV-генерації. Висновки обґрунтовують технічну доцільність інтеграції BESS у мережі 0,4 кВ як інструменту оптимізації режимів роботи, адаптивного балансування навантажень та ефективної інтеграції ВДЕ, з можливістю подальшого використання економічних механізмів управління попитом, зокрема тарифних моделей Time-of-Use та Net Billing.

Вступ. Розвиток розподіленої генерації на рівні низьковольтних мереж 0,4 кВ супроводжується суттєвими змінами у їх режимах. Масове підключення малих сонячних і вітрових електростанцій створює нерівномірність енергопотоків, зворотні потоки потужності та напругові коливання, що призводить до підвищення втрат і погіршення якості електроенергії [1]. У мережах із високою часткою фотоелектричних установок ці явища проявляються найвиразніше через обмежену приймальну здатність ліній 0,4 кВ і значну варіативність профілів споживання [2].

Одним із найефективніших технічних рішень для стабілізації режимів розподільчих мереж 0,4 кВ є використання систем накопичення енергії (Battery Energy Storage Systems, BESS). Сучасні дослідження демонструють, що BESS, інтегровані безпосередньо у вузли низьковольтних фідерів, здатні акумулювати надлишкову електроенергію в періоди профіциту генерації та здійснювати розряд під час пікових навантажень, діючи як кероване джерело гнучкості [3]. Такий підхід забезпечує зниження добової варіативності потужності, скорочення технічних втрат активної енергії, обмеження перевантажень та утримання напруги у межах нормативного діапазону, що є критично важливим для надійної роботи мереж із високою часткою розподіленої генерації.

Згідно з оглядом Stecca та ін. [4], застосування BESS у низьковольтних мережах дозволяє реалізовувати режими peak shaving та load shifting, що забезпечує до 10–15 % зниження втрат і до 20 % зменшення амплітуди відхилень напруги в порівнянні з некомпенсованими режимами. Результати числового моделювання, наведеного у роботі Micalef та співавт. [5], підтверджують ефективність координації заряджання та розряджання акумуляторів для зменшення несиметрії фаз і коливань напруги у розподільчих мережах 0,4 кВ.

Разом із тим у більшості публікацій [1–5] увага приділяється або концептуальним аспектам інтеграції систем накопичення енергії, або моделюванню окремих сценаріїв для

середньої напруги. Практичні підходи до кількісної оцінки ефектів саме BESS у мережах 0,4 кВ (з погляду втрат, стабільності напруги та фазової несиметрії) залишаються недостатньо розробленими. Відсутність узгодженої методики «до / після впровадження BESS» обмежує можливість системного порівняння результатів та впровадження у практику операторів систем розподілу.

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю технічної оптимізації режимів роботи розподільчих мереж 0,4 кВ в умовах зростання кількості споживачів, які встановлюють власні джерела генерації, та значної варіативності навантажень протягом доби.

Метою дослідження є оцінка впливу BESS на режими роботи розподільчих мереж 0,4 кВ за технічними показниками: втратами активної енергії, відхиленням напруги (ΔU), симетрією фаз та рівнем використання генерації від ВДЕ. Для досягнення мети проаналізовано результати досліджень, у яких розглянуто режими заряду BESS у години профіциту фотоелектричної генерації та розряду у періоди пікових навантажень, а також оцінено їхній вплив на втрати потужності, балансування фаз і підтримання допустимих значень напруги. Додатково враховано здатність BESS покращувати параметри роботи мережі за рахунок часткової компенсації реактивної складової навантаження, що сприяє підтриманню нормативних режимів електроживлення. Оцінювання результатів здійснюється шляхом зіставлення станів «до/після впровадження BESS» зі систематизацією змін ключових параметрів мережі. Наведені кількісні оцінки базуються на узагальненні результатів числового й експериментального моделювання, представлених у [2–6]. Окремо розглядається узгодження режимів BESS з моделями активного споживання (prosumer), а також вплив тарифів Time-of-Use і Net Billing на режими заряду/розряду накопичувача. Практичні умови реалізації таких моделей в Україні визначаються Законом № 3220-IX, який унормовує самовиробництво електроенергії споживачами та застосування механізму Net Billing.

Матеріал і результати досліджень.

Оцінювання ефективності функціонування низьковольтних розподільчих мереж базується на комплексі технічних показників, які відображають енергетичні втрати, стабільність параметрів напруги, симетрію фаз і рівень використання відновлюваних джерел енергії. Ці критерії є базовими для аналізу ефективності інтеграції систем накопичення енергії, оскільки саме вони безпосередньо характеризують якість електропостачання та стан режимів мережі.

Втрати активної енергії є одним з головних показників ефективності. У низьковольтних мережах 0,4 кВ частка втрат у загальному балансі системи традиційно є найбільшою — від 6 до 10 % від переданої електроенергії залежно від топології фідерів і рівня навантаження [1]. Наявність розподіленої генерації, особливо фотоелектричної, змінює напрямки потоків потужності, що призводить до зростання втрат, коли генерація перевищує споживання на окремих ділянках лінії [2]. Використання систем накопичення енергії дозволяє згладжувати ці коливання, приймаючи надлишкову потужність у години профіциту та повертаючи її під час пікових навантажень, завдяки чому втрати активної енергії зменшуються на 8–12 % [3].

Стабільність напруги (показник ΔU) є ще одним критерієм, що визначає якість електроенергії. У низьковольтних мережах із високою часткою інтегрованої PV-генерації спостерігаються відхилення напруги до ± 10 % від номіналу, особливо у години інтенсивної роботи СЕС [2; 4]. Згідно з результатами експериментального моделювання, проведеного Šimić та співавт. [3], встановлення BESS у точці максимального навантаження дозволило зменшити амплітуду відхилень напруги приблизно на 2 % від абсолютного значення, що забезпечило стабілізацію режиму у межах нормативів IEC 60038.

Несиметрія фаз виникає через нерівномірне підключення однофазних навантажень і розподілених джерел. Це спричиняє появу зворотних послідовностей струмів, додаткові втрати та нагрів трансформаторів. Для типових побутових мереж рівень несиметрії може сягати 5–7 % за напругою та 10–15 % за струмом. Дослідження Micallef та співавт. [5]

показують, що інтеграція BESS з алгоритмами фазового балансування здатна зменшити ці значення приблизно на 10–12 %, забезпечуючи симетричнішу розподільчу напругу навіть за нерівномірного розташування PV-установок.

Важливим показником оцінювання ефективності використання ВДЕ є *рівень самоспоживання (self-consumption) електроенергії*, виробленої PV-установкою. У мережах без систем накопичення частка самоспоживання зазвичай не перевищує 75–80 %, оскільки генерація та графік споживання не синхронізовані за часом [2]. Надлишки енергії в години пікової генерації вимушено передаються в мережу, що знижує ефективність її використання. Інтеграція BESS дозволяє акумулювати надлишкову генерацію та використовувати її в години дефіциту, підвищуючи коефіцієнт самоспоживання до 90–92 %, що підтверджується результатами моделювання низьковольтних мереж з розподіленою PV-генерацією [6]. Таким чином, BESS виступає інструментом не лише балансування режимів мережі, але й суттєвого підвищення частки самовикористання відновлюваної електроенергії, що є ключовим фактором ефективності prosumer-моделей.

Наведені показники є підґрунтям для оцінювання впливу BESS на режими роботи розподільчої мережі 0,4 кВ. У цьому контексті важливо визначити, які саме режими мережі змінюються внаслідок інтеграції накопичувача, а також через які фізичні процеси реалізується стабілізаційний ефект BESS — зокрема, обмеження пікових навантажень, згладжування добових коливань потужності, компенсація небалансу фаз, підтримання допустимих рівнів напруги та оптимізація напрямку перетоків потужності у моменти профіциту або дефіциту генерації.

Оптимізація режимів розподільчих мереж 0,4 кВ із використанням систем накопичення енергії ґрунтується на балансуванні енергопотоків у часі та фазах. Основна ідея полягає в тому, що BESS накопичує надлишок генерації від фотоелектричних установок у денні години профіциту, коли споживання мінімальне, та віддає енергію у вечірній період пікових навантажень [3; 4]. Такий алгоритм «заряд–розряд» дозволяє вирівнювати графік навантаження, знижувати пікові потужності фідера і стабілізувати напругу у вузлах мережі.

У практичних реалізаціях для керування BESS застосовуються часові стратегії (Time-based Control) або адаптивні алгоритми з урахуванням прогнозу генерації PV та споживання. Додатково BESS може працювати в режимі підтримання параметрів електроживлення, зокрема коригувати баланс активної та реактивної потужності, що сприяє утриманню коефіцієнта потужності на рівні 0,95–1,0 [4; 5]. Це зменшує величину реактивних перетоків у мережі, знижує додаткові втрати в провідниках і створює передумови для стабілізації напруги та симетризації фаз у вузлі підключення.

Результати досліджень Micallef та співавт. [5] і Korab та ін. [6] підтверджують, що поєднання механізмів peak shaving і demand-side management забезпечує зниження пікового навантаження на 15–20 % та втрат активної потужності на 8–12 % у порівнянні з некомпенсованими режимами. Отримані ефекти узагальнено у таблиці 1. Показники в таблиці узагальнюють результати моделювання та експериментів із незалежних досліджень, у яких оцінювалися режими мереж 0,4 кВ без BESS та із застосуванням BESS.

Таблиця 1. Основні ефекти оптимізації мереж 0,4 кВ при застосуванні систем накопичення енергії (BESS)

№	Показник	Без BESS	З BESS	Очікуваний ефект
1	Втрати активної енергії	100%	≈ 90 %	↓ на 8–12 %
2	Пікове навантаження	180 кВт	≈ 150 кВт	↓ на 15–20 %
3	Відхилення напруги ΔU	±10 %	±8 %	стабілізація на 15–20 %
4	Несиметрія фаз	100%	≈ 85 %	↓ на 10–12 %
5	Рівень використання ВДЕ	80%	≈ 92 %	↑ на 12 %

Примітка. Узагальнено на основі результатів досліджень [2–6].

Узагальнені результати показують, що використання BESS у вузлах розподільчої мережі 0,4 кВ дозволяє одночасно зменшити втрати активної енергії в лініях, утримувати напругу в допустимому діапазоні та підвищити частку самоспоживання електроенергії від PV-генерації на рівні споживача. Отримані тенденції підтверджують доцільність подальшого аналізу структурної моделі BESS та алгоритмів керування, завдяки яким досягаються зазначені ефекти.

Ефективність цих процесів визначається не лише ємністю або потужністю батарей, а передусім архітектурою системи керування та взаємодією між її компонентами — генерацією, споживачами та контролером енергопотоків. У цьому контексті важливо розглянути структурну модель системи оптимізації, яка відображає логіку взаємодії зазначених елементів у межах мережі 0,4 кВ.

Досліджуваний вузол мережі 0,4 кВ, у якому керування режимами здійснюється за допомогою BESS включає чотири основні компоненти: вузол підключення PV-генерації, систему накопичення енергії (BESS), точку приєднання prosumer та контролер енергоменеджменту (EMS). У типовій конфігурації PV-генерація, BESS і навантаження підключені до спільної шини, а EMS координує потоки активної потужності між ними з урахуванням стану заряду накопичувача, профілю споживання та режимних параметрів мережі [4; 5].

У години надлишкової PV-генерації контролер заряджає BESS для підтримання допустимої напруги; після досягнення повного заряду надлишок покриває локальне навантаження або обмежується інвертором, щоб не допустити перевищення напругових параметрів у фідері. У періоди дефіциту — під час вечірніх або ранкових піків — акумулятор розряджається, зменшуючи навантаження на трансформатор та лінії [3; 5]. Додатково контролер може регулювати реактивну складову потужності, забезпечуючи компенсацію й підвищення коефіцієнта потужності [4]. Така архітектура дозволяє формувати стабільні напругові режими без централізованого керування та забезпечує ефективну інтеграцію джерел генерації, підключених на рівні 0,4 кВ. Наведену взаємодію між основними компонентами системи ілюструє рисунок 1.

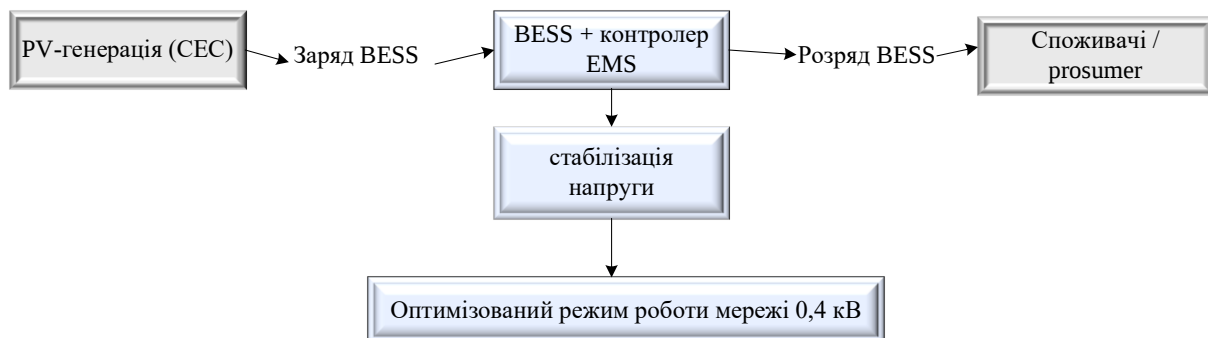


Рис. 1. Схема оптимізації енергопотоків у мережі 0,4 кВ із використанням BESS.

Показана на рисунку 1 структура ілюструє взаємодію ключових елементів енергосистеми та демонструє логіку оптимізації режимів 0,4 кВ у реальному часі. Координація між PV-генерацією, BESS і споживачами забезпечує баланс енергопотоків, мінімізацію перевантажень і стабілізацію напруги без необхідності централізованого втручання. Така архітектура спрощує інтеграцію відновлюваних джерел у мережі, зменшує технічні втрати й підвищує стійкість системи до змін навантаження [3–5].

Узагальнюючи, можна зазначити, що BESS забезпечує балансування потужності, стабілізацію напруги та збільшення частки самоспоживання електроенергії від PV-генерації. Оптимізовані режими роботи мережі 0,4 кВ із використанням BESS демонструють відчутне зменшення втрат і покращення параметрів якості електроенергії. Подальше вдосконалення таких систем пов'язане з інтеграцією механізмів активного споживання — prosumer-моделей

і тарифів Time-of-Use, що створює основу для переходу до децентралізованих енергетичних спільнот.

Висновки. Проведене дослідження підтвердило, що системи накопичення енергії є ефективним інструментом оптимізації режимів роботи розподільчих мереж 0,4 кВ. Згідно з узагальненими результатами оглянутих досліджень, використання BESS дозволяє зменшити втрати активної енергії приблизно на 8–12 %, знизити пікові навантаження до 20 %, стабілізувати напругу в межах нормативних допусків і скоротити фазову несиметрію на 10–12 %.

Ефективність такого рішення забезпечується автоматизованою взаємодією PV-генерації, BESS і контролера енергоменеджменту, який координує потоки потужності без централізованого втручання. Це дозволяє адаптивно керувати режимами мережі, знижувати перевантаження вузлів та підвищувати стійкість функціонування розподільчої інфраструктури.

Подальші напрями роботи пов'язані з розширенням застосування BESS у моделях активного споживання prosumer, інтеграцією тарифів Time-of-Use та механізму Net Billing, що дозволить поєднати технічні ефекти оптимізації з економічними стимулами для споживачів-виробників. Узгодження цих підходів є перспективним напрямом підвищення енергоефективності й надійності мереж 0,4 кВ із високою часткою розподіленої PV-генерації.

Список використаної літератури

1. Bani Ahmad A., Abdelaziz A. Y., Abido M. A. Overview of energy storage systems in modern power systems: operation, control and applications. *Energy Reports*. 2025. Vol. 11. P. 253–274. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2025.01.027>
2. Goryl W., Korpysz K., Jurasz J. Low-voltage prosumer installations with energy storage systems — case study of the residential area. *Energies*. 2025. Vol. 18 (3). P. 1452–1468. <https://doi.org/10.3390/en18031452>
3. Šimić Z., Stojanović D., Đukanović S. Impact of battery energy storage systems on voltage profiles and losses in LV distribution networks. *Proc. of EEM 2022*. Zagreb: IEEE, 2022. P. 1–5. <https://doi.org/10.1109/EEM54801.2022.9920964>
4. Stecca M., Benini M., Bovo C. et al. Integration of battery energy storage systems in low-voltage networks: control strategies and applications. *IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society*. 2020. Vol. 1. P. 184–198. <https://doi.org/10.1109/OJIES.2020.3038265>
5. Micallef A., Spiteri-Staines C., Licari J. Voltage regulation in low-voltage distribution networks with unbalanced penetrations of photovoltaics and battery storage systems. *IET Smart Grid*. 2024. Vol. 7 (3). P. 264–276. <https://doi.org/10.1049/stg2.12155>
6. Korab R., Ippolito M. G., Sanseverino E. R. Demand-side management using distributed energy storage systems and time-of-use tariffs. *Energies*. 2024. Vol. 17 (5). P. 2508–2521. <https://doi.org/10.3390/en17052508>
7. Про внесення змін до деяких законів України щодо відновлення та "зеленої" трансформації енергетичної системи України: Закон України від 30.06.2023 № 3220-IX: станом на 30 черв. 2024 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3220-20#Text> (дата звернення: 01.11.2025).
8. EUEA (Ukrainian Energy Association). *Net Billing Mechanism in Ukraine: Status, Challenges and Outlook*. Kyiv: EUEA, 2024. 34 p.

Trachuk A.R., PhD student, **Polyachenko I.O.** master student,
Shevchenko A.P. master student,
National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Ukraine

SYSTEMS ANALYSIS TOOLS AND THEIR APPLICATION IN THE FIELD OF RENEWABLE ENERGY

The global transition toward renewable energy sources (RES) demands not only technological innovation but also a systemic rethinking of how energy systems are planned, operated, and governed. Systems analysis offers a powerful interdisciplinary framework for navigating this complexity. It enables decision-makers to integrate technical, economic, environmental, and social dimensions into coherent strategies that are both resilient and future-oriented.

In the context of renewable energy, systems analysis tools are essential for modeling hybrid configurations, optimizing resource allocation, assessing financial viability, and managing uncertainty. These tools are particularly valuable in countries like Ukraine, where energy decentralization, climate commitments, and post-crisis recovery intersect.

Key tools for systems analysis in renewable energy

Several advanced tools have become indispensable in the practical application of systems analysis for RES:

- **HOMER (hybrid optimization of multiple energy resources)** is a simulation and optimization platform widely used for designing hybrid and off-grid energy systems. It evaluates the techno-economic feasibility of various configurations by considering local resource availability, load profiles, fuel prices, and capital costs. In Ukraine, HOMER has been instrumental in community energy planning, especially in rural areas aiming for energy autonomy through solar, wind, and battery storage integration. It also supports scenario testing for resilience under grid disruptions or fuel shortages.

- **SAM (system advisor model)**, developed by the U.S. National Renewable Energy Laboratory (NREL), provides detailed performance and financial modeling for photovoltaic, solar thermal, wind, and other renewable systems. SAM supports scenario analysis, sensitivity testing, and investment planning. It is widely used in both academic and professional settings to evaluate project bankability, simulate policy impacts, and compare technology options. In Ukraine, SAM has supported feasibility studies for municipal solar installations and donor-funded energy transition projects.

- **REopt Lite** is a web-based tool that helps users identify optimal combinations of distributed energy technologies and storage to minimize lifecycle costs and enhance resilience. It is particularly relevant for critical infrastructure planning in Ukraine, where energy security and backup power for schools, hospitals, and administrative buildings have become urgent priorities due to geopolitical instability. REopt Lite also supports resilience planning for climate-related risks such as heatwaves and grid overloads.

- **RETScreen** is a comprehensive clean energy management software developed by Natural Resources Canada. It supports feasibility analysis, performance tracking, and emissions reduction assessment across a wide range of technologies. RETScreen is increasingly used by municipalities and regional authorities in Ukraine to evaluate the long-term sustainability and financial viability of energy efficiency and RES projects. It also facilitates carbon accounting and alignment with EU climate reporting standards.

Practical Applications in Ukraine

The practical application of these tools in Ukraine demonstrates their value in supporting evidence-based decision-making and accelerating the energy transition. For instance, the “Energy-Independent Community” initiative used HOMER to design hybrid systems tailored to local

conditions, enabling cost-effective deployment of solar and biomass solutions. In Lviv, SAM was employed to assess rooftop solar potential for public schools, resulting in successful grant applications and public-private partnerships.

REopt Lite has been used to develop energy resilience hubs in conflict-affected regions, ensuring continuity of essential services during blackouts. RETScreen has supported regional climate action plans by modeling the impact of energy efficiency measures and renewable integration on emissions and municipal budgets.

These tools also play a role in donor coordination and investment planning. International partners increasingly require robust modeling to justify funding allocations, and systems analysis tools provide the transparency and rigor needed to build trust and secure financing.

Educational and Strategic Integration

In the academic sphere, systems analysis tools are being integrated into curricula on energy management, sustainable development, and urban planning. Students use them to simulate energy transition scenarios, evaluate policy instruments, and design community-scale solutions. This hands-on experience fosters a new generation of professionals equipped to lead the energy transition with analytical rigor and systems thinking.

By visualizing trade-offs and synergies among energy, environment, and equity goals, these tools support inclusive dialogue and transparent planning. In Ukraine's context, where post-war reconstruction and EU integration are driving forces, systems analysis provides a strategic lens for aligning local action with national and international climate commitments.

Moreover, these tools are increasingly used in participatory planning processes. Municipalities and civil society organizations use visual outputs from SAM, HOMER, and RETScreen to engage citizens, communicate benefits, and co-design energy strategies. This democratization of energy planning strengthens public trust and fosters long-term ownership of sustainability initiatives.

Conclusion

Systems analysis tools are not merely technical instruments—they are enablers of strategic foresight, resilience, and innovation. Their application in renewable energy planning empowers communities, informs policy, and accelerates the shift toward a sustainable, decentralized, and climate-neutral energy future. In Ukraine and beyond, these tools are helping to build energy systems that are not only efficient and low-carbon, but also inclusive, adaptive, and aligned with broader societal goals.

Список використаної літератури

1. National Renewable Energy Laboratory. System Advisor Model (SAM). – <https://sam.nrel.gov>
2. HOMER Energy. Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources. – <https://www.homerenergy.com>
3. REopt Lite Web Tool – National Renewable Energy Laboratory. – <https://reopt.nrel.gov>
4. RETScreen Clean Energy Management Software. – Natural Resources Canada. – <https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-publications/tools/data-analysis-software/retscreen/7465>

КЕРУВАННЯ ПОПИТОМ НА ЕЛЕКТРИЧНУ ЕНЕРГІЮ ШЛЯХОМ ІНТЕГРАЦІЇ АВТОМАТИЧНИХ ВИМИКАЧІВ 0,4 КВ В СИСТЕМУ АСКОЕ

Анотація

У статті розглянуто проблему балансування попиту та пропозиції електричної енергії в сучасних енергетичних системах та обґрунтовано доцільність використання автоматичних вимикачів 0,4 кВ у поєднанні з автоматизованими системами комерційного обліку електроенергії (АСКОЕ) як інструменту реалізації концепції Smart Grid. **Ключові слова:** Smart Grid, АСКОЕ, автоматичні вимикачі 0,4 кВ, керування попитом, енергоефективність, критична інфраструктура, автоматизація, енергетична безпека.

Вступ

Сучасні енергетичні системи стикаються з викликами балансування попиту та пропозиції електроенергії. Зростання навантажень, інтеграція відновлюваних джерел і потреба підвищення енергоефективності зумовлюють необхідність впровадження нових методів управління споживанням. Одним із перспективних напрямів є інтеграція автоматичних вимикачів 0,4 кВ з АСКОЕ, що створює основу для побудови гнучких і стійких Smart Grid систем [1],[2].

Мета дослідження

Підвищення ефективності, надійності та стійкості енергосистеми шляхом інтеграції автоматичних вимикачів 0,4 кВ у систему АСКОЕ та впровадження механізмів автоматизованого керування попитом на електроенергію.

Матеріал і результати досліджень

1. Керування попитом у концепції Smart Grid

Smart Grid передбачає цифровізацію процесів розподілу електроенергії та гнучке керування навантаженням через інтелектуальні системи моніторингу. АСКОЕ забезпечує збір даних у реальному часі, що дозволяє прогнозувати навантаження, аналізувати історичні тенденції та запобігати перевантаженням [3],[4]. Застосування керування попитом дає змогу рівномірно розподіляти навантаження між споживачами, оптимізувати роботу підстанцій, зменшувати втрати електроенергії та підвищувати надійність мережі. У критичних умовах система може визначати пріоритетні споживачі й автоматично відключати некритичні навантаження, забезпечуючи стабільність енергосистеми навіть під час воєнних дій.

2. Роль автоматичних вимикачів 0,4 кВ

Традиційно автоматичні вимикачі використовуються для захисту мережі від коротких замикань і перевантажень. Однак у поєднанні з АСКОЕ вони виконують функцію дистанційного керування навантаженням та можуть автоматично відключати споживачів при перевищенні лімітів потужності [5],[6]. Така інтеграція дозволяє операторам системи розподілу оперативно регулювати споживання, підвищуючи стабільність і гнучкість мережі навіть у разі аварій. Це перетворює вимикачі з пасивного елемента захисту на активний компонент Smart Grid.

3. Інтеграція вимикачів у систему АСКОЕ

Інтеграція вимикачів відбувається через комунікаційні модулі, що забезпечують обмін даними між обладнанням і диспетчерським центром. Це дозволяє реалізувати автоматичні алгоритми керування навантаженням [7],[8]. У пікові години система може відключати некритичні пристрої (наприклад, кондиціонери чи нагрівачі), а вночі — дозволяти роботу енергоємних установок. Це зменшує потребу у пікових генераціях і сприяє економії ресурсів. В умовах воєнних дій така технологія є особливо важливою. Вона дає змогу стабілізувати

систему після пошкоджень, мінімізувати наслідки аварій, забезпечити електропостачання об'єктів критичної інфраструктури та здійснювати пріоритизацію споживачів за рівнем важливості.

4. Автоматизація процесу обмеження навантаження

Нині більшість систем АСКОЕ лише збирають дані з електролічильників, а контроль за дотриманням лімітів виконується вручну, що потребує часу й ресурсів. Запропонована інтеграція дозволяє автоматично виконувати команди з обмеження потужності через вимикачі 0,4 кВ, мінімізуючи участь персоналу. Це забезпечує швидке реагування, зниження експлуатаційних витрат і підвищення надійності системи.

5. Програмне забезпечення для ранжування споживачів

Для ефективного застосування обмежень потужності необхідне програмне забезпечення, яке автоматично визначатиме черговість відключення споживачів за критеріями: критичність (лікарні, водо- і теплопостачання); економічна значущість; споживана потужність; вид діяльності; участь у оборонних об'єктах; час останнього відключення. Такий підхід забезпечує справедливість, прозорість і рівномірність у застосуванні обмежень, а також підвищує швидкість реагування системи на надзвичайні ситуації.

6. Переваги та виклики впровадження

Переваги інтегрованої системи:

- підвищення енергоефективності та зменшення пікових навантажень;
- зниження аварійності електромереж;
- покращення якості електропостачання; скорочення витрат на обслуговування [9],[10].

Основні виклики:

- необхідність стандартизації протоколів обміну даними;
- висока початкова вартість обладнання [11]. Подальший розвиток нормативної бази та здешевлення технологій поступово усунуть ці бар'єри.

Висновки

Інтеграція автоматичних вимикачів 0,4 кВ у систему АСКОЕ є ефективним інструментом реалізації концепції Smart Grid. Вона забезпечує автоматизоване керування попитом, швидке реагування на аварії та підвищує енергетичну безпеку держави. Система дозволяє без залучення персоналу відключати некритичних споживачів у разі перевищення лімітів, стабілізуючи роботу мережі в умовах пікових навантажень або воєнних загроз. Розробка програмного забезпечення для ранжування споживачів забезпечує справедливе й ефективне розподілення електроенергії та підвищує гнучкість системи управління. Впровадження таких рішень є стратегічним кроком до створення надійної, адаптивної та стійкої енергосистеми України, здатної функціонувати в умовах як нормальної експлуатації, так і надзвичайних ситуацій [12],[13].

Список використаної літератури

1. European Network of Transmission System Operators for Electricity (ENTSO-E). Demand Side Response Report. – Brussels, 2023.
2. IEA. Digital Demand-Driven Electricity Systems. International Energy Agency, 2022.
3. Кучеренко В.І. Smart Grid: сучасний стан та перспективи розвитку. – Київ: НТУУ «КПІ», 2021.
4. Пахомов О. Інтелектуальні системи обліку електроенергії. – Харків: ХНУРЕ, 2020.
5. Schneider Electric. Low Voltage Circuit Breakers in Smart Grids. – Paris, 2021.
6. Siemens AG. Integration of Circuit Breakers into AMI Systems. – Munich, 2022.
7. ABB Group. Smart Metering and Load Control Solutions. – Zurich, 2023.
8. GE Energy. Advanced Metering Infrastructure. – Boston, 2020.
9. Мельник С.П. Проблеми кібербезпеки в енергетиці. – Львів: ЛНУ, 2021.
10. NIST. Guidelines for Smart Grid Cybersecurity. – Gaithersburg, 2022.
11. IEC 61850 Standard for Communication Networks and Systems in Substations. – Geneva, 2021.
12. Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України. Звіт про впровадження АСКОЕ. – Київ, 2023.
13. Ministry of Energy of Ukraine. Smart Grid Roadmap 2035. – Київ, 2022.

Козловський Є.В., аспірант, ORCID 0009-0009-2753-3900,
науковий керівник: докт.техн.наук, професор **А.В. Волошко**,
Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ДЖЕРЕЛА ПРОВАЛУ НАПРУГИ

Анотація. У роботі представлено порівняльний аналіз методів визначення джерела провалу напруги в електричних мережах на основі оцінки широкого спектра аналітичних та інтелектуальних показників. Проаналізовано ефективність класичних підходів [1; 2], що ґрунтуються на аналізі потужності, струму, імпедансу та фазових зсувів, узагальнених методів [5; 6] із застосуванням компонент Кларка та інтегральних критеріїв, а також алгоритмів машинного навчання [8; 9]. Показано, що традиційні методи забезпечують точність на рівні 70–85 %, узагальнені — близько 80–92 %, тоді як інтелектуальні моделі, зокрема метод опорних векторів та гібридні нейромережеві підходи, досягають 94–99 % правильних класифікацій. Результати дослідження демонструють перевагу комбінованих та інтелектуальних методів у складних аварійних сценаріях, особливо в умовах асиметричних коротких замикань і високого опору замикання. Отримані висновки можуть бути використані для вдосконалення систем моніторингу якості електроенергії та впровадження інтелектуальних алгоритмів в технології Smart Grid.

Ключові слова: імпедансний аналіз; миттєві потужності; фазові зсуви; методи Кларка; аналітичні індикатори; опір замикання; машинне навчання; метод опорних векторів; Smart Grid.

Вступ. Проблема визначення джерела провалу напруги є однією з ключових у сучасних електроенергетичних системах, оскільки провали напруги залишаються найпоширенішим порушенням якості електроенергії та можуть виникати сотні й тисячі разів на рік у різних частинах мережі. Їхнє точне та оперативне локалізування має критичне значення як для усунення аварій, так і для врегулювання спірних питань між операторами мережі та споживачами. У науковій літературі запропоновано широкий спектр методів для визначення розташування джерела провалу напруги — від класичних аналітичних підходів, що базуються на змінах потужності, струму, імпедансу та фазових характеристик, до узагальнених методик, створених для підвищення точності у складних режимах роботи систем з асиметричними аваріями та розподіленою генерацією. Останніми роками стрімкого розвитку набули інтелектуальні методи, зокрема машинне навчання на основі методу опорних векторів (SVM) та гібридні нейромережеві підходи, які демонструють значно вищу точність порівняно з традиційними методами. Таким чином, актуальним є порівняльний аналіз існуючих, узагальнених та інтелектуальних методів для визначення напрямку до джерела провалу напруги, що і становить предмет цих досліджень.

Метою досліджень є проведення порівняльного аналізу традиційних, узагальнених та інтелектуальних методів визначення розташування джерела провалу напруги, оцінка їхньої точності та актуальності в різних аварійних сценаріях та визначення найбільш ефективних підходів для практичного застосування в сучасних електроенергетичних системах.

Матеріал та результати досліджень.

Матеріалом дослідження слугували публікації останніх років, присвячені визначенню джерела провалу напруги в розподільних мережах, а також результати моделювання провалів різних типів: симетричних, асиметричних, з низьким і високим опором замикання, а також таких, що виникають як на стороні споживача, так і на стороні джерела живлення. Значну увагу приділено класичним джерелам, що описують фізичну природу провалів напруги та їх параметри [1; 2; 3].

На основі аналізу широкого спектра аналітичних та інтелектуальних показників виконано їх систематизацію за основними групами: потужнісні, струмові, фазові, імпедансні методи, критерії на основі компонент Кларка, а також сучасні підходи машинного навчання. Узагальнені векторні та фазорні методи базувалися на роботах Ма, Чень та Іравані, де наведено детальний опис моделей позитивної послідовності та динамічних фазорів [5; 6].

Порівняльний аналіз показав, що класичні потужнісні та імпедансні методи забезпечують ефективність на рівні 70–85 %, що узгоджується з результатами Боллена та рекомендаціями IEEE [1; 2]. Узагальнені фазорні та векторні показники демонструють точність близько 80–92 %, що підтверджено в роботах з аналізу напруги в α – β координатах і фазорному просторі [5; 6].

Найвищу точність демонструють інтелектуальні методи машинного навчання — метод опорних векторів (SVM - Support Vector Machine), згорткові нейронні мережі (CNN-Convolutional Neural Network) та гібридні моделі CNN–LSTM (Long Short-Term Memory), які враховують повну форму сигналу та його частотно-часову структуру [8; 9]. Їхня ефективність становить 94–99 %, що значно перевищує можливості класичних підходів навіть у зашумлених і змішаних аварійних сценаріях.

Узагальнені результати наведено в таблиці 1.

Таблиця показує, що існує три основні покоління методів визначення джерела провалу напруги. Найстаріші, так звані класичні методи (на основі зміни струму, потужності або імпедансу), дають точність приблизно 70–85 % і добре працюють лише для простих випадків, наприклад при симетричних провалах або низькоомних коротких замиканнях. Узагальнені методи, які використовують перетворення Кларка, фазорний аналіз або векторні показники, працюють точніше — близько 80–92 %, тому що беруть до уваги форму векторів напруги та струму, а не окремі скалярні величини.

Найвищу точність показують сучасні інтелектуальні методи, такі як SVM, CNN або комбіновані нейромережеві моделі. Їхня точність сягає 94–99 %, оскільки вони враховують повну структуру сигналу — як часові зміни, так і взаємодію між фазами, імпедансом, кутами та енергетичними параметрами. Таблиця також демонструє, що кожен метод має свою сферу застосування: одні краще працюють при асиметричних провалах, інші — при високому опорі замикання, ще інші — у сильно зашумлених мережах.

Чим точніший метод, тим правильніше він визначає, де саме виникла проблема — у мережі споживача чи енергокомпанії. Це критично важливо для аналізу аварій, уникнення помилкових відключень, вирішення спірних ситуацій між сторонами та підвищення якості електропостачання.

Але якщо враховувати не лише точність, а й «ціну» методу, то ситуація виглядає по-іншому. Класичні методи, які базуються на аналізі струму, потужності або імпедансу, є найдешевшими, оскільки не потребують складної апаратури чи великих обчислювальних ресурсів. Проте їхня точність залишається на рівні 70–85 %, що робить їх придатними лише для простих або передбачуваних умов роботи мережі. Узагальнені методи на основі перетворення Кларка, фазорного аналізу та векторних показників потребують трохи дорожчих вимірювальних модулів, але забезпечують кращу точність — приблизно 80–92 %. Саме вони найчастіше застосовуються в сучасних цифрових реле, оскільки дають оптимальний баланс між вартістю реалізації та достовірністю визначення джерела провалу напруги.

Методи машинного навчання, такі як SVM, CNN чи LSTM, є найдорожчими, адже потребують високої частоти дискретизації, значних обчислювальних ресурсів та періодичного перенавчання моделі. Зате їхня точність сягає 94–99 %, що дозволяє коректно класифікувати навіть складні, зашумлені та змішані провали, які класичними способами визначити важко. Таким чином, врахування вартості показує, що найоптимальнішим рішенням у більшості практичних випадків є методи середнього рівня складності — на основі векторних та фазорних ознак, тоді як інтелектуальні підходи доцільно застосовувати лише там, де критично важлива максимальна точність.

Таблиця 1 - Порівняльний аналіз методів визначення джерела провалу напруги

№	Назва методу	Формула (текстовий формат)	Короткий опис	Коли застосовується	Ефективність (%)
1	Інтеграл активної потужності	$\int P(t)dt$	Порівняння активної енергії до/після провалу	Симетричні та змішані провали	75–85
2	Інтеграл реактивної потужності	$\int Q(t)dt$	Аналіз зміни реактивної енергії	Асиметричні L–G, L–L	78–88
3	Повна зміна потужності	$\Delta S = \sqrt{P^2 + Q^2}$	Оцінка комплексної зміни потужності	Універсальний метод	76–85
4	Зміна реактивної потужності	$\Delta Q = Q_{\text{після}} - Q_{\text{до}}$	Реактивна потужність як індикатор напрямку	Провали з замиканнями	75–86
5	Зміна фазних струмів	$\Delta I_A, \Delta I_B, \Delta I_C$	Порівняння форм струмів	До/після виникнення короткого замикання	80–88
6	Інтеграл струму	$\int i(t)dt$	Енергетична зміна струму	Короткі провали	74–84
7	Інтеграл активної складової струму	$\int i(t) \cdot \cos\varphi(t)dt$	Виокремлює активну частину	Низькоомні провали	78–88
8	Зміна фазної напруги	ΔU_ϕ	Порівняння падіння у фазах	Усі види провалів	80–90
9	Мінімальна напруга під час провалу	$U_{\min}$	Мінімум напруги у провалі	Класифікація ступеня	80–88
10	Максимальне зростання струму	$\Delta I_{\max}$	Гранична зміна струму	Низькоомні КЗ	82–90
11	Миттєва активна потужність	$p(t) = u(t) \cdot i(t) \cdot \cos\theta(t)$	Аналіз профілю миттєвої потужності	Короткі саги	84–92
12	Інтеграл фазового зсуву	$\int \Delta\varphi(t)dt$	Інтегральна зміна кута напруги	Провали на трансформаторах	82–90
13	Тангенс кута потужності	$\tan\theta = Q/P$	Аналіз кута навантаження	При зміні навантаження	74–82
14	Різниця тангенсів	$\Delta\tan\theta = \tan\theta_{\text{після}} - \tan\theta_{\text{до}}$	Стабільний фазовий індикатор	Провали через споживача	80–90
15	Компоненти Кларка (α, β)	$\alpha = \dots; \beta = \dots$	Перехід до площини $\alpha\beta$	Для асиметричних провалів	85–92
16	Фазовий інтеграл Кларка	$\int \alpha \tan(\beta/\alpha)dt$	Динамічна оцінка вектора напруги	Змішані провали	85–92
17	Реактивна потужність у Кларка	$\int Q_\alpha(t)dt$	Реактивна енергія в $\alpha\beta$	Коп-компонентний аналіз	86–94
18	Модуль імпедансу	$Z = U/I$	Зміна імпедансу – індикатор напрямку	Найпоширеніший класичний метод	80–90
19	Зміна імпедансу ΔZ	$\Delta Z = Z_{\text{після}} - Z_{\text{до}}$	Напрямний критерій	Провали у мережах 6–35 кВ	82–92
20	Реальна частина імпедансу	$\text{Re}(Z)$	Знак $\text{Re}(Z)$ вказує напрям	Дуже надійний для КЗ	80–90
21	Векторна зміна імпедансу	$\Delta \text{Re}(Z), \Delta \text{Im}(Z)$	2-вимірний індикатор	Точні діагностики	84–92
22	Метод SST (Slope S vs F)	$k = \Delta P / \Delta(P)$	Аналіз нахилу P залежно від F	Для фідерних мереж	82–90
23	Метод позитивної послідовності (U^+)	U^+, φ^+	Зміна U^+ найінформативніша	Асинхронні провали	85–95
24	Струм позитивної послідовності (I^+)	I^+, φ^+	Струмовий напрямний індикатор	Провали через КЗ	85–95
25	Фазорний метод P–Q	Траєкторія ($P(t), Q(t)$)	Аналіз руху точки в площині	Довгі провали, нестабільні режими	86–94
26	Середній фазовий зсув	$\varphi_{\text{ср}} = (\varphi_A + \varphi_B + \varphi_C)/3$	Плавний індикатор	Провали в мережах з гармоніками	82–90
27	SVM-класифікація	$y = \text{sign}(\sum \alpha_i K(x_i, x) + b)$	Опорні вектори + набір ознак	Універсальний метод, високоточний	94–97
28	CNN для часових рядів	$y = \text{CNN}(u(t), i(t))$	Глибоке навчання за сигналом	Краще при шумі	94–98
29	Гібрид CNN–LSTM	$y = \text{LSTM}(\text{CNN}())$	Аналіз локальних і часових ознак	Найвисока точність сучасності	95–99

Висновок

Аналіз показує, що доцільність використання того чи іншого методу визначення джерела провалу напруги залежить від умов мережі, доступного обладнання та вимог до точності. Для простих та передбачуваних режимів, де провали виникають переважно через низькоомні короткі замикання, достатньо класичних методів на основі струмів, потужностей і імпедансу — вони прості, доступні та не потребують додаткових обчислювальних ресурсів. Проте їх точність обмежується рівнем 70–85 %, тому такі підходи доцільно застосовувати

лише в недорогих системах моніторингу або там, де швидкість важливіша за абсолютну точність.

У мережах із нерівномірним навантаженням, високим опором замикання та складними видами провалів оптимальним вибором стають векторні методи середньої складності — компоненти Кларка, фазорні показники, траєкторії $P-Q$ та зміна комплексного імпедансу. Вони не потребують надмірних обчислень, працюють стабільно навіть у зашумлених умовах та забезпечують точність на рівні 80–92 %, що робить їх найкращим компромісом для сучасних цифрових реле та систем РЗА.

Найвищу точність демонструють інтелектуальні методи машинного навчання, зокрема SVM, CNN, LSTM та їх гібриди, здатні враховувати повну форму сигналу та приховані взаємозв'язки між ознаками. Їхня точність сягає 94–99 %, що значно перевищує можливості класичних алгоритмів. Проте через високу вартість реалізації, вимоги до швидкодіючої апаратури та необхідність підтримки моделей, такі методи доцільно застосовувати лише у складних або критичних енергооб'єктах, де помилка визначення джерела провалу може призвести до значних фінансових втрат або неправильних рішень релейного захисту.

Список використаної літератури

1. Боллен М. Г. Й. Розуміння проблем якості електроенергії: провали та перерви напруги. Нью-Йорк: АйЕЕЕ Прес, 2000. 543 с.
2. Стандарт IEEE 1159-2009. Рекомендована практика IEEE щодо моніторингу якості електричної енергії. Нью-Йорк: Інститут інженерів з електротехніки та електроніки, 2009. 81 с.
3. ** Дуган Р., МакГранаган М., Сантосо С., Бітті Г.** Якість електроенергетичних систем. 3-тє вид. Нью-Йорк: МакГроу-Гілл, 2012. 528 с.
4. Фарія да Сілва Ф., Бак К. Л. Визначення місця виникнення провалу напруги на основі методу еквівалентного джерела напруги // Транзакції IEEE з передавання електроенергії. 2013. Т. 28, № 4. С. 2576–2584.
5. Ма Цзі., Лю Сін, Терзія В. Локалізація джерела провалу напруги на основі вимірювань ПФС (PMU) та системних імпедансів // Транзакції IEEE з передавання електроенергії. 2015. Т. 30, № 6. С. 2442–2450.
6. Чень Я., Іравані М. Р. Ідентифікація домінантного режиму провалу напруги на основі моделі миттєвого динамічного фазора // Транзакції IEEE з передавання електроенергії. 2013. Т. 28, № 2. С. 1029–1037.
7. Рібейро П. Ф., Дуке К. А., Сергейра А. С., Боллен М. Г. Й. Проблеми якості електроенергії та автоматизація підстанцій: індекси та класифікація провалів напруги // Дослідження електроенергетичних систем. 2018. Т. 154. С. 64–74.
8. Чжу Кай, Лі Гован, Сюй Чже. Визначення джерела провалу напруги за допомогою SVM-класифікації на основі багатокомпонентного набору ознак // Транзакції IEEE з передавання електроенергії. 2019. Т. 34, № 4. С. 1402–1412.
9. Лі Гован, Чжао Сін, Се Сін. Ідентифікація джерела провалу напруги на основі глибокого навчання з використанням гібридної моделі CNN–LSTM // ІЕТ “Генерація, передача та розподіл”. 2021. Т. 15, № 12. С. 1889–1899.

Євсєєв Є.В., магістр,
Науковий керівник **Черкашина Г.І.** к.т.н., доцент,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна

ОСОБЛИВОСТІ РОЗРОБЛЕННЯ ПРОЄКТНОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ СЕС АКТИВНИХ СПОЖИВАЧІВ: ВІД СТАТУСУ ДО СКЛАДУ ПД

Анотація: У статті досліджено ключові особливості розроблення проєктної документації (ПД) для сонячних електростанцій (СЕС) нових суб'єктів енергоринку — активних споживачів. Проаналізовано колізії та взаємозв'язки між двома регуляторними полями: будівельним законодавством (ДБН А.2.2-3, ДСТУ 8907:2019) та енергетичним (Закон «Про ринок електричної енергії», Кодекс систем розподілу).

Встановлено, що визначальним фактором, який впливає на склад, стадійність та процедуру погодження ПД, є не лише клас наслідків (СС1/СС2) об'єкта, але й тип процедури приєднання генеруючої установки, визначений Кодексом систем розподілу.

У результаті дослідження запропоновано функціональну класифікацію активних споживачів, що базується на поділі приєднань на стандартне та нестандартне. Ця класифікація дозволяє чітко визначити необхідність проходження експертизи, стадійність проєктування ("РП" або "П"+"Р") та ключовий склад інженерних розділів ПД, зокрема обов'язковість розробки розділів релейного захисту та автоматики (РЗіА) і телемеханіки для об'єктів з нестандартним приєднанням.

Ключові слова: активний споживач, проєктна документація, СЕС, стандартне приєднання, нестандартне приєднання, ДБН А.2.2-3, Кодекс систем розподілу (КСР), клас наслідків.

Вступ: Активний розвиток розподіленої генерації та впровадження нових європейських норм в українське законодавство створюють нові виклики для проєктної галузі. З появою в Законі України «Про ринок електричної енергії» такого суб'єкта, як "активний споживач", проєктувальники зіткнулися з необхідністю поєднувати класичні вимоги будівельних норм (ДБН) зі специфічними вимогами енергетичного регулятора (НКРЕКП).

Активний споживач — це суб'єкт який не лише споживає, але й виробляє, може зберігати та продавати надлишки електроенергії в мережу. Таким чином, його електроустановка перестає бути пасивним навантаженням і стає активним елементом, що впливає на режими роботи мережі Оператора системи розподілу (ОСР).

Метою даної статті є дослідження та систематизація особливостей розроблення проєктної документації для СЕС активних споживачів. Для досягнення мети в статті вирішено такі завдання:

Проаналізовано статус "активного споживача" та як вимоги Кодексу систем розподілу (КСР) впливають на технічні вимоги до ПД.

Розглянуто загальні вимоги ДБН А.2.2-3 щодо складу та стадійності ПД залежно від класу наслідків.

Розроблено та запропоновано практичну класифікацію активних споживачів, що дозволяє проєктувальнику однозначно визначити необхідний склад, зміст та процедуру погодження ПД.

Аналіз та результати дослідження

Основним нормативним документом, що регулює склад та зміст проєктної документації, є ДБН А.2.2-3:2014 «Склад та зміст проєктної документації на будівництво». Цей стандарт охоплює нове будівництво, реконструкцію, капітальний ремонт та технічне переоснащення об'єктів.

Для проєктів СЕС критично важливим є правильне визначення виду будівництва:

- Нове будівництво: встановлення наземної СЕС на окремій земельній ділянці.
- Реконструкція або технічне переоснащення: встановлення СЕС на даху або фасаді існуючої будівлі оскільки це змінює навантаження на конструкції та інженерні мережі об'єкта.

Це розмежування має принципове значення: для дахових СЕС склад проєкту має обов'язково включати звіт про технічне обстеження будівлі. Цей документ підтверджує спроможність покрівлі та несучих конструкцій витримати додаткове навантаження від фотоелектричних модулів.

Згідно з ДБН А.2.2-3:2014, процес проєктування може здійснюватися в одну, дві або три стадії (ТЕО, ЕП, П, РП, Р). Визначення кількості стадій залежить від категорії складності об'єкта та класу наслідків:

Одностадійне проєктування (стадія РП — Робочий проєкт). Передбачає розробку документації, яка поєднує затверджувальну частину та робочі креслення. Цей підхід рекомендований для технічно нескладних об'єктів.

Двостадійне проєктування (стадії П + Р). Спочатку розробляється стадія «Проєкт» (П) — затверджувальна частина, що підлягає експертизі. Після її погодження виконується «Робоча документація» (Р) для безпосереднього виконання будівельних робіт. Це стандартний підхід для складних об'єктів.

Тристадійне проєктування (ЕП/ТЕО + П + Р). Застосовується для об'єктів, що потребують детального техніко-економічного обґрунтування інвестицій або складних архітектурних рішень.

Для СЕС вибір між одно- та двостадійним проєктуванням безпосередньо залежить від визначеного класу наслідків.

2.3 Вплив класу наслідків: Клас наслідків є фундаментальним параметром, що визначає рівень потенційної небезпеки для людей та обсяг можливих матеріальних збитків у разі аварії чи відмови об'єкта. Класифікація здійснюється наступним чином:

СС1 (незначні наслідки): об'єкти з постійним перебуванням до 50 осіб або можливим збитком до 2500 м.р.з.п. (мінімальних розмірів заробітної плати).

СС2 (середні наслідки): об'єкти з постійним перебуванням від 51 до 400 осіб або збитком від 2501 до 72 500 м.р.з.п.

СС3 (значні наслідки): об'єкти з постійним перебуванням понад 400 осіб або збитком понад 72 500 м.р.з.п.

Для непобутових активних споживачів коректне визначення класу наслідків СЕС є критичним етапом, оскільки це регламентує складність проєкту, необхідність проходження експертизи та дозвільну процедуру:

Висновки: У результаті дослідження зроблено висновок, що традиційний підхід до проєктування, базований виключно на класі наслідків (СС1/СС2) згідно ДБН, є недостатнім для активних споживачів. Встановлено, що проєктна документація таких об'єктів знаходиться на перетині будівельного та енергетичного законодавства, а тому вирішальним фактором, що доповнює клас наслідків, є тип приєднання визначений Кодексом систем розподілу. Запропонована функціональна класифікація, що поєднує обидва ці критерії, дозволяє чітко розмежувати випадки: вона підтверджує одностадійне проєктування (РП) для об'єктів СС1 зі стандартним приєднанням та обґрунтовує необхідність двостадійного проєктування (П+Р) з обов'язковою експертизою та розробкою специфічних інженерних розділів (РЗіА, телемеханіка) для об'єктів СС2 з нестандартним приєднанням.

Список використаних джерел:

1. Про ринок електричної енергії : Закон України від 13.04.2017 р. № 2019-VIII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19>
2. Про регулювання містобудівної діяльності : Закон України від 17.02.2011 р. № 3038-VI. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3038-17>
3. ДБН А.2.2-3:2014. Склад та зміст проєктної документації на будівництво. / [Чинний від 2014-10-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2014. 31 с.

4. ДСТУ 8907:2019. Настанова щодо визначення класу наслідків (відповідальності) та категорії складності об'єктів будівництва. / [Чинний від 2019-12-01]. Київ : ДП "УкрНДНЦ", 2019.
5. Про затвердження Кодексу систем розподілу : Постанова НКРЕКП від 14.03.2018 р. № 310. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0310874-18>
6. Про затвердження Порядку розроблення проектної документації на будівництво об'єктів : Наказ Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України від 16.05.2011 р. № 45. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0651-11>
7. Про затвердження Порядку розрахунку класу наслідків (відповідальності) та категорії складності об'єктів будівництва : Наказ Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України від 06.11.2017 р. № 289. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1437-17>

Мірошніченко А.М., здобувач вищої освіти магістерського рівня,
Сулим М. Ю., здобувач вищої освіти магістерського рівня,
Петрова К.Г., канд. техн. наук, доцент
Центральноукраїнський національний технічний університет, Україна

РЕГІОНАЛЬНІ ЕНЕРГЕТИЧНІ КОМПЛЕКСИ УКРАЇНИ: ІНТЕГРАЛЬНА ОЦІНКА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ДЛЯ СТАЛОГО РОЗВИТКУ

Енергетична безпека та підвищення рівня енергоефективності є ключовими пріоритетами сталого розвитку України. Сучасні виклики, пов'язані з обмеженістю енергетичних ресурсів, глобальними екологічними загрозами та необхідністю скорочення викидів парникових газів, зумовлюють потребу у формуванні ефективної системи управління енергоспоживанням на всіх рівнях — від державного до регіонального. Саме регіональні енергетичні комплекси виступають базовими елементами енергетичної системи країни, що поєднують виробництво, розподіл та споживання енергії в межах територіальних громад та промислових зон.

Нерівномірність розвитку енергетичних інфраструктур, різний рівень використання відновлюваних джерел енергії, а також відмінності у структурі споживання енергоресурсів вимагають розроблення комплексних підходів до оцінювання енергоефективності на регіональному рівні. Традиційні методи аналізу часто не відображають багатофакторність і взаємозалежність показників, що впливають на енергетичний потенціал регіону. У цьому контексті інтегральна оцінка енергоефективності виступає ефективним інструментом для узагальнення великої кількості показників і формування єдиного індикатора, який відображає реальний стан та динаміку енергетичного розвитку територій.

Проведення інтегральної оцінки дозволяє виявити регіональні диспропорції, визначити сильні та слабкі сторони енергетичних систем, а також сформулювати науково обґрунтовані рекомендації щодо підвищення ефективності використання енергоресурсів. Отримані результати можуть стати основою для прийняття стратегічних рішень у сфері енергетичного планування, сприяти збалансованому розвитку економіки та забезпеченню енергетичної незалежності України.

Різноманітність економічної структури, кліматичних умов та енергетичних ресурсів визначає специфіку енергоефективності у різних регіонах України. Західні області, які активно впроваджують відновлювані джерела енергії (ВДЕ), мають значний потенціал зниження енерговитрат у порівнянні з індустріально розвиненими східними регіонами, де переважають традиційні енергетичні технології [1-7].

Основні проблеми включають [8]:

- високу енергоємність виробництва у промислових регіонах;
- незадовільний рівень модернізації енергетичного обладнання;
- недостатнє впровадження систем енергоменеджменту та автоматизації;
- низьку ефективність використання ВДЕ у деяких регіонах.

Інтегральна оцінка енергоефективності регіональних енергетичних комплексів є ключовим інструментом для реалізації державної політики у сфері енергозбереження, сталого розвитку і дозволяє:

- визначити слабкі та сильні сторони енергетичних комплексів кожного регіону;
- обґрунтувати пріоритети інвестування в модернізацію енергетичної інфраструктури;
- розробити регіональні програми енергозбереження з урахуванням економічного і соціального потенціалу;
- підвищити конкурентоспроможність регіональної економіки за рахунок зниження енергетичних витрат;

- сприяти виконанню міжнародних зобов'язань щодо зниження викидів парникових газів.

Застосування інтегрального оцінювання бере участь у плануванні енергетичного балансу, оптимізації ресурсного забезпечення та підвищенні екологічної безпеки регіонів України.

Висновки

1. Інтегральне оцінювання енергоефективності регіональних енергетичних комплексів України — це комплексний підхід, який дозволяє врахувати різні аспекти використання енергії на регіональному рівні з метою підвищення ефективності та сталості енергетичної системи загалом.

2. Регіональні відмінності та їх вплив на енергоспоживання вимагають адаптованих рішень для кожної області. Запровадження інтегральної оцінки дає змогу досягти ефективного використання ресурсів, знизити негативний вплив на довкілля та підтримати економічний розвиток.

3. Подальші дослідження і розвиток методології оцінювання сприятимуть посиленню енергетичної безпеки України і переходу до «зеленої» економіки.

Список використаної літератури

1. Пімоненко В. В. Інтегральне оцінювання енергоефективності регіональних комплексів. — Київ: Національна академія наук, 2020. — 35 с.
2. Рейтинг оцінювання енергоефективності регіонів України / під ред. І. І. Коваленка. — Київ: КП, 2022. — 40 с.
3. SAEE. Практичний посібник з енергетичного аудиту. — Київ, 2021. — 120 с.
4. Лежнюк П. Д., Комар В. О., Рубаненко О. О. Аналіз стану енергоефективності регіонів України // Вісник технічного університету. — 2021. — № 4. — С. 129–140.
5. Аналітичний звіт: Аналіз існуючого стану в сфері енергоефективності України. — Львів: Львівський енергетичний інститут, 2018. — 50 с.
6. Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України (SAEE). Регіональний розвиток та енергоефективність. — Київ, 2025.
7. Методи оцінювання доцільності впровадження заходів з енергоефективності в регіонах України. — Київ: КП, 2023. — 80 с.
8. Стратегія енергетичного розвитку України до 2030 року. — Київ: Міністерство енергетики України, 2023. — 90 с.

Тимофєєва К.О., здобувач вищої освіти магістерського рівня,
Петрова К.Г., канд. техн. наук, доцент
Центральноукраїнський національний технічний університет, Україна

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНЕ ПРОГНОЗУВАННЯ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ ПРОМИСЛОВИХ ОБ'ЄКТІВ З УРАХУВАННЯМ ЗОВНІШНІХ ФАКТОРІВ ВПЛИВУ

Сучасний розвиток промисловості вимагає підвищення ефективності використання енергетичних ресурсів, що є одним із ключових чинників конкурентоспроможності підприємств. Електроенергія становить значну частку витрат у виробничих процесах, тому точне прогнозування її споживання має вирішальне значення для планування виробництва, оптимізації навантажень на енергетичні системи та мінімізації витрат. Невизначеність у споживанні електроенергії може призводити до перевитрат ресурсів, втрат енергії, збоїв у виробничому процесі та підвищення собівартості продукції. А отже, виникає потреба у впровадженні інтелектуальних систем, здатних автоматично аналізувати велику кількість даних і враховувати вплив зовнішніх факторів – кліматичних умов, календарних циклів, виробничих змін тощо. Традиційні методи прогнозування, засновані на статистичних або регресійних моделях, часто не враховують складну, нелінійну природу процесів енергоспоживання, а також вплив зовнішніх факторів — температури, вологості, пори року, виробничого графіка тощо.

У зв'язку з цим особливої актуальності набувають інтелектуальні методи прогнозування, що базуються на використанні технологій штучного інтелекту, машинного навчання та нейронних мереж. Такі підходи дають змогу не лише підвищити точність прогнозів, але й адаптуватися до змін зовнішнього середовища та поведінкових закономірностей споживання електроенергії. Розроблення ефективних інтелектуальних систем прогнозування є необхідною умовою для реалізації концепцій «розумного виробництва» (Smart Factory) та «розумної енергетики» (Smart Energy).

Використання методів машинного навчання, нейронних мереж, нечіткої логіки та гібридних моделей відкриває нові можливості для підвищення точності прогнозування енергоспоживання. Це, у свою чергу, сприяє оптимізації енергетичних витрат, підвищенню енергоефективності промислових підприємств та зменшенню негативного впливу на довкілля. Отже, дослідження у напрямі інтелектуального прогнозування електроспоживання з урахуванням зовнішніх факторів є актуальним і має важливе наукове та практичне значення.

На разі, під час прогнозування електроспоживання широко застосовують методи статистичного аналізу, алгоритми машинного навчання (нейронні мережі, дерева рішень) та гібридні підходи, які сполучають переваги класичних і інтелектуальних методів. Особливо важливим є моделювання часових рядів з урахуванням зовнішніх факторів, що дозволяє адаптивно підлаштовувати прогнози під різні умови роботи підприємства й змінність зовнішнього середовища.

Серед панівних методів доцільно розглядати:

- 1) статистичні: регресійний аналіз, ARIMA, експоненційне згладжування;
- 2) машинне навчання: нейронні мережі (включно з рекурентними та LSTM), метод опорних векторів, дерева рішень;
- 3) гібридні: поєднують класичні та інтелектуальні підходи для підвищення адаптивності й точності.

Особливо перспективними є нейронні мережі зі здатністю враховувати часові залежності та складні зв'язки між показниками.

У роботі пропонується модульна система, що складається із збору та попередньої обробки даних (очищення, нормалізація); аналізу впливу факторів (визначення ваги

зовнішніх параметрів); використання вибраної моделі прогнозування; оцінки точності та корекції моделей; візуалізації та прийняття управлінських рішень.

Запровадження таких систем дозволить:

- знизити енергетичні витрати;
- оптимізувати режим роботи обладнання;
- підвищити надійність енергопостачання;
- зменшити техногенний вплив на довкілля.

Подальші дослідження спрямовані на вдосконалення моделей за допомогою глибокого навчання і великих даних.

Висновки

1. Прогнозування електроспоживання з урахуванням зовнішніх факторів є ключовим для ефективного управління енергетичними ресурсами промислових підприємств.

2. Сучасні гібридні моделі, що комбінують статистичні та нейронні підходи, забезпечують значне покращення точності прогнозів у порівнянні з класичними методами. Це дає змогу створювати адаптивні системи, що враховують складність та динаміку технологічних і кліматичних змін, забезпечуючи економію ресурсів і стабільність роботи. Розвиток таких технологій відкриває нові можливості для інтеграції відновлюваних джерел та модернізації енергосистем.

Список використаної літератури

1. Глібка Н. Л. Прогнозування споживання електричної енергії промисловим підприємством : магістерська дисертація. – Київ, 2024. – 88 с. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/64060>
2. Бурий С. В., Халімов В. В. Оцінка методів прогнозування електроспоживання підприємств // Наукові праці ВНТУ. – 2014. – № 2.
3. Короткострокове прогнозування та керування електроспоживанням промислового підприємства // Електротехніка та комп'ютерні науки. – 2019. <https://ela.kpi.ua/items/bf7519f5-e6e3-44f4-8672-c07a7b881179>
4. Пономаренко В. В. Розробка методики прогнозування електроспоживання з урахуванням впливу параметрів навколишнього середовища та виробничих параметрів : магістерська дисертація. – КП, 2023. https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/27883/1/Ponomarenko_magistr.pdf
5. Система прогнозування енергоспоживання промислових об'єктів : розробка програмних засобів. – 2025. <https://ela.kpi.ua/items/a46d583d-888e-4a1b-8ce5-10a33ea1a261>
6. Титюк В. К. Вплив зовнішніх факторів на електроспоживання підприємств // Вісник технічного університету. 2022. http://ds.knu.edu.ua:8080/jspui/bitstream/123456789/7795/1/Прогнозування_енергоспоживання_промислового_підприємства.pdf
7. Огляд сучасних методів прогнозування електроспоживання з урахуванням зовнішніх факторів // International Science Journal of Engineering & Agriculture. – 2022. <https://isg-journal.com/isjea/article/view/23>

Моргунов А.Д., здобувач вищої освіти магістерського рівня,
Петрова К.Г., канд. техн. наук, доцент
Центральноукраїнський національний технічний університет, Україна

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ПРОМИСЛОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ НА ОСНОВІ ГІБРИДНИХ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Сучасна енергетика переживає перехідний етап до більш стійких і гнучких моделей енергопостачання. Для промислових підприємств питання підвищення енергоефективності та зниження залежності від централізованих джерел стало стратегічним пріоритетом. Гібридні системи електропостачання, які поєднують відновлювані джерела енергії з традиційними, дозволяють забезпечити стабільність електропостачання, мінімізувати втрати енергії та зменшити обсяги викидів парникових газів.

Метою роботи є дослідження можливостей впровадження гібридної фотоелектричної системи (ГФЕС) для електропостачання промислового об'єкта середньої потужності та оцінка її техніко-економічної ефективності.

Основні завдання:

- провести аналіз енергоспоживання об'єкта;
- розробити структурну схему гібридної системи;
- змодельовати роботу системи в різних режимах;
- визначити економічні показники ефективності (термін окупності, річна економія, зменшення витрат на електроенергію).

Методологічну основу становить енергетичний баланс споживання та генерації електроенергії в умовах промислового навантаження. Для моделювання використано програмне середовище HOMER Pro, яке дозволяє оцінити оптимальну конфігурацію гібридної системи за критеріями мінімуму приведених витрат.

Гібридна система складалася з фотоелектричного поля (PV), акумуляторної батареї (LiFePO₄), дизель-генератора резервного живлення та мережевого підключення. Для вихідних даних використано типовий графік навантаження промислового цеху з річним споживанням 1,2 ГВт·год. Метеорологічні умови базувалися на даних Meteonorm для Київської області.

Розрахунки засвідчили, що оптимальна конфігурація системи включає фотоелектричну станцію потужністю 350 кВт, акумуляторну батарею ємністю 500 кВт·год і дизель-генератор потужністю 150 кВт для пікових навантажень.

Частка генерації із сонячної енергії становить близько 42% від загального річного споживання, що дозволяє зменшити витрати на електроенергію з мережі на 38%. Річна економія становить орієнтовно 2,4 млн грн, при цьому термін окупності системи не перевищує 6,5 років.

Енергетичний аналіз показав, що рівень самозабезпечення підприємства електроенергією зріс з 0% (у базовій схемі) до 47%, а викиди CO₂ зменшилися на 290 тонн за рік.

Економічна ефективність впровадження оцінювалася за системою показників:

- чиста приведена вартість (NPV), що становить 4,8 млн грн;
- внутрішня норма прибутковості (IRR) - 16,3%;
- термін окупності PV-модулів – 5,8 року;
- екологічна вигода – скорочення споживання вугілля на 120 тонн на рік.

Отримані результати підтверджують доцільність інвестицій у модернізацію системи електропостачання на основі ВДЕ.

Висновки

1. Гібридна фотоелектрична система забезпечує зниження споживання електроенергії з централізованої мережі та скорочення експлуатаційних витрат промислового об'єкта.
2. Економічні розрахунки свідчать про високу привабливість інвестицій у ГФЕС за рахунок стабільної генерації, короткого періоду окупності та низьких експлуатаційних витрат.
3. Запропонована методика може бути адаптована для інших промислових об'єктів, з урахуванням їх специфіки навантаження та географічного розташування.
4. У перспективі рекомендується інтегрувати систему з інтелектуальним управлінням енергоспоживанням (Smart Grid) для подальшої оптимізації енергетичних потоків.

Список використаної літератури

1. Гаврик І.Р. Гібридне електрозабезпечення промислових об'єктів від дахових фотоелектричних систем: дисертація. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. – 164 с.
2. Міліх В.І. Електропостачання промислових підприємств: підручник. – Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. – 403 с.
3. Люшин В.О. Проектування електропостачання об'єктів з використанням фотоелектричних установок: магістерська робота. – Луцьк: Луцький національний технічний університет, 2025. – 78 с.
4. Інтегрування відновлюваних джерел енергії до електропостачання промислових підприємств // Вісник Вінницького національного технічного університету. – 2022. – №3(167). – С. 54–61.
5. Fedorenko A.O. Розробка проекту гібридної системи електропостачання житлового будинку з організацією блискавкозахисту: дипломний проект. – Київ: НТУУ «КПІ», 2021. – 67 с.
6. Оцінка техніко-економічної ефективності впровадження фотоелектричних систем // Відновлювальна енергетика. – 2021. – №2. – С. 89–92.
7. Garazd A.C. Проектування гібридних систем електропостачання з ВДЕ для різних типів об'єктів: кваліфікаційна робота. – Львів: ЛНУП, 2025. – 92 с.
8. Посібник з сонячних фотоелектричних технологій. – Київ: Фонд Держенергоефективності, 2023. – 108 с.
9. Вуркун К. Оптимізація продуктивності фотоелектричних систем з використанням систем моніторингу: магістерська робота. – Суми: СумДУ, 2025. – 65 с.
10. Аналіз ефективності інноваційного гібридного енергопостачання з використанням гібридного теплового і фотоелектричного геліоколектора // Моделювання та інформаційні технології в електроенергетиці та автоматизації. – 2023. – №11(42). – С. 102–110.

АНАЛІЗ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ ЩОДО ОГОРОДЖЕНЬ ТА ІНЖЕНЕРНИХ СИСТЕМ АДМІНІСТРАТИВНОЇ БУДІВЛІ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИМОГ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЗГІДНО ДІЮЧИХ НОРМ

Вступ. Серед інструментів державного регулювання процесів підвищення енергоефективності в будівельному фонді можна виокремити: правові, адміністративні, економічні [1-2]. Вимоги щодо енергоефективності огорожень та інженерних систем будівель закріплено і на законодавчому рівні [2], і на рівні будівельних норм і стандартів [3,4], що враховують під час проектування нових будівель і розробки проектів реконструкції, в тому числі під час відновлення будівель, зруйнованих під час військової агресії. В 2025 році були введені нові вимоги [5], що стосуються NZEB-будівель. Вивчення особливостей технічних рішень для будівель згідно вказаних вимог є актуальним завданням для дослідження.

Мета роботи. Метою є огляд технічних рішень щодо огорожень та інженерних систем на прикладі адміністративної будівлі для досягнення класу енергоефективності С для нових будівель, а також пропозиції для дотримання вимог NZEB-будівель. Виконано необхідні техніко-економічні розрахунки та визначено енергетичні показники та теплотехнічні характеристики огорожень.

Матеріал і результати дослідження.

Об'єкт дослідження: об'єктом дослідження є адміністративна будівля, розрахована на одночасне перебування близько 100 осіб на годину, що має два поверхи і підвальне приміщення, в якому організоване укриття з дизель-генераторним приміщенням. На входах в будівлю влаштовано тамбури. Будівля має квадратну форму в плані з допоміжними прибудовами, сумарна опалювальна площа 768 м², загальна площа 957 м²; показник компактності 0,54 м⁻¹. Об'ємно-просторові і архітектурні рішення створюють функціональний і естетично привабливий простір для відвідувачів.

Опис огорожувальних конструкцій. Зовнішні стіни - залізобетонний каркас із сендвіч панелями, перекриття монолітні залізобетонні. На фасадах передбачено скляні вітражі, що підкреслюють концепцію публічних установ за принципом «відкритого простору» (open space). Цоколь оздоблено фасадною плиткою по утеплювачу. Покрівля – плоска, з монолітного залізобетону ефективним тепло- та гідроізоляційним шаром. Підлога – на ґрунті, утеплена пінополістиролом, передбачена гідроізоляція.

Трансмісійні та інфільтраційні тепловтрати у приміщеннях будівлі компенсуватимуться за допомогою системи опалення, що складається з конвекторів та сталевих панельних радіаторів. Проектується загальнообмінна, припливно-витяжна з рекуперацією теплоти витяжного повітря з приміщень, 1 та 2 поверхів, де перебувають люди, а також витяжна вентиляція з санвузлів.

Методика розрахунків та результати досліджень.

Для оцінки визначення питомого енергоспоживання і розробки енергетичних сертифікатів для будівель використовується методика ДСТУ 9190:2022 [3] та рекомендації, вказані у підзаконних нормативних документах до Закону України [2]. Методика [3] враховує: кліматичні умови, внутрішній мікроклімат, конструкцію огорожень, час експлуатації. Виконано розрахунки трансмісійних тепловтрат через огорожувальні конструкції, енергопотреб на вентиляцію повітря, теплові надходження від зовнішніх і внутрішніх джерел, додаткові витрати; враховано характеристики інженерних систем та

ефективність роботи генеруючого обладнання [1]. Для виконання моделювання була розроблена математична модель для виконання обчислень питомої енергопотреби на опалення, охолодження, гарячого водопостачання, вентиляції, освітлення, а також питомого енергоспоживання, первинної енергії, викидів CO₂ та класу енергоефективності.

Розглядалися два варіанти технічних рішень (табл.1) щодо огорожень та інженерних систем для вказаного об'єкта досліджень:

- сценарій 1: нова будівля відповідає класу енергоефективності C;
- сценарій 2: нова будівля відповідає вимогам до NZEB – будівлі.

Таблиця 1 – Порівняльний аналіз результатів

№	Найменування показника, од.виміру	Сценарій 1	Сценарій 2
1	Приведений опір теплопередачі, (м ² ·К)/Вт - зовнішні стіни - суміщене покриття (дах) - вікна, вітражі	4,0 7,02 0,9	4,18 7,98 1,07
2	Тип джерела теплової енергії	Централізоване теплопостачання	Повітряний тепловий насос із резервуванням електродотопом (вода 45/35 °C)
3	Питома енергопотреба на опалення та охолодження, кВт·год/м ²	35,3	14,5
4	Клас енергоефективності	C	A
5	Регулювання опалення	погодозалежне регулювання	погодозалежне регулювання, температура чергового режиму опалення 10 °C
6	Організоване охолодження	ні	так

Клас енергоефективності будівлі для двох сценаріїв наведено на рис. 1.

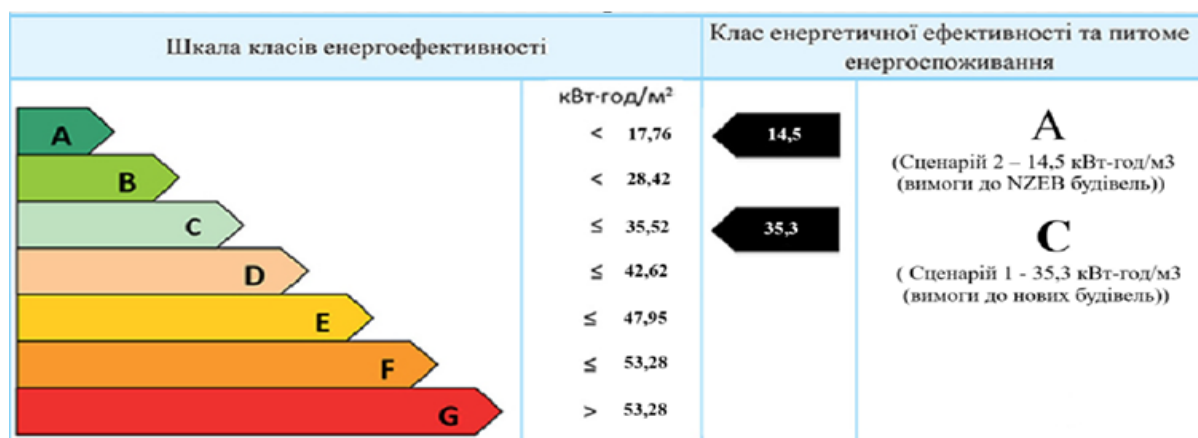


Рисунок 1 – Клас енергоефективності будівлі

Для будівлі, що розглядається, в ході дослідження також було виконано:

- розрахунки теплотехнічних характеристик огорожень, визначено приведений опір зовнішніх стін з урахуванням теплопровідних включень, а також визначена приведена температура внутрішньої поверхні огорожень та оцінено дотримання санітарно-гігієнічних вимог;

- проведено оцінку тепловологісного стану зовнішньої стіни для запобігання можливості зволоження матеріалів огорожувальної конструкції і уникнення можливості конденсації водяної пари на внутрішній поверхні огороження.

Подальшим кроком у виконанні дослідження в рамках магістерської роботи буде виконання перевірочних розрахунків енергетичних показників даної будівлі за допомогою спеціалізованого програмного продукту для енергоаудиторів E-audit (рис.2).

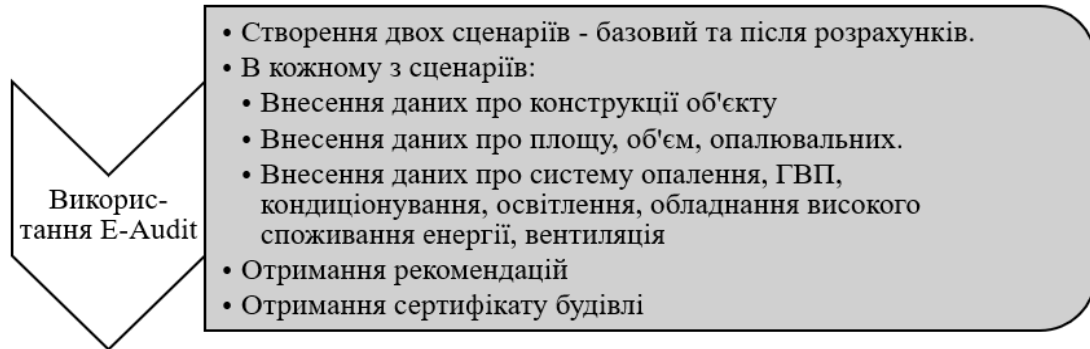


Рисунок 2 – Схема роботи в програмному продукті E-audit

Висновки:

- в рамках виконання магістерської роботи виконано аналіз технічних рішень на прикладі адміністративної будівлі для забезпечення вимог енергоефективності для нових будівель та NZEB- будівель; при цьому моделювання енергоспоживання здійснено за допомогою розробленої математичної моделі в Excel за методикою ДСТУ 9190:2022 та інших нормативних документів;

- проведено розрахунки теплотехнічних характеристик огорожувальних конструкцій та виконано оцінку тепловологісного стану огорожень;

- в подальшому доцільним буде проведення моделювання енергоспоживання за допомогою спеціалізованого програмного продукту E-audit і проведення порівняльного аналізу результатів розрахунків.

Список використаних джерел:

1. Оборонов Т.Ю., Шовкалюк М.М., Ткач М.О. Огляд програм підтримки комплексних технічних рішень з енергоефективності в житловому секторі // Збірник наук. праць X міжнар. наук.-техн. та навч.-метод. конф. "Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку –РЕМС'2024". [Київ, 26-27 листопада 2024 р.], с.173-175.
2. Про енергетичну ефективність будівель: Закон України 2118-VIII, ред. від 30.06.2024.
3. ДСТУ 9190:2022 Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання при опаленні, охолодженні, вентиляції та гарячого водопостачання.
4. ДБН В.2.6-31:2021 Теплова ізоляція та енергоефективність будівель.
5. Деякі питання запровадження вимог до будівель з близьким до нульового рівнем споживання енергії: Наказ міністерства розвитку громад та територій України № 168 від 06.02.2025.

АНАЛІЗ СУТТЄВИХ СПОЖИВАЧІВ ЕНЕРГІЇ СПОРТИВНИХ СПОРУД

Вступ. Сучасні спортивні об'єкти мають високий рівень енергоспоживання, зокрема теплової та електричної енергії, що викликано потребою підтримки комфортного мікроклімату, обігріву води для басейнів та роботи насосного обладнання. Аналіз суттєвих споживачів енергії є важливим завданням під час проведення енергоаудиту та впровадження систем енергоменеджменту.

Мета та завдання досліджень. Аналіз суттєвих споживачів енергії, систем і установок, які формують найбільші обсяги енергетичних витрат.

Матеріал та результати дослідження. Спортивні споруди суттєво відрізняються за функціональним призначенням, технічним оснащенням та режимами роботи, оскільки спеціально спроектовані та обладнані під проведення спортивних змагань з різних видів спорту. Дані причини впливають на структуру споживання теплової і електричної енергії та загалом на енергоспоживання даних об'єктів. В результаті аналізу літературних джерел серед основних типів спортивних споруд слід виокремити:

- *льодові ацени:* основне енергоспоживання пов'язане з підтриманням необхідних параметрів мікроклімату та стану льодової поверхні. Згідно джерела [1], п'ятьма основними технічними підсистемами та одночасно найбільшими споживачами енергії є системи освітлення, опалення, охолодження, осушення та вентиляції, разом вони становлять 95% споживачів енергії. Система охолодження відповідає за найбільшу частку споживання енергії, наступна у частині балансу є система опалення. Значну частку також становлять системи освітлення, вентиляції та осушення повітря, тоді як решта енергії припадає на різних споживачів енергії.

- *плавальні басейни:* значну долю споживання формує підігрів води, вентиляція та осушення приміщень, освітлення. Згідно дослідження [2], продемонстрували значну невідповідність у споживанні енергії між тепловою та електричною енергією у п'яти спортивних комплексах з критими басейнами. Їхній аналіз виявив більшу залежність від опалення (теплого та енергетичного) у всіх п'яти досліджених випадках басейнів. Споживання природного газу для опалення становило від 66% до 77% від загального споживання енергії, тоді як електроенергія становила від 23% до 34%.

- *універсальні спортивні ацени/зали:* найбільші енергетичні потреби займає система опалення, яке споживає 40–60% загального обсягу енергії, забезпечуючи підтримання комфортної температури. Освітлення та нагрів води мають середній рівень енергоспоживання 10–20 %, тоді як вентиляція та допоміжне обладнання споживають менше (до 5 %). Ліфти, ескалатори та офісна техніка формують незначну частку становлять та ставить близько 1 %, однак у сукупності всі ці компоненти створюють повний енергетичний баланс споруд та визначають напрямки енергоаудиту [3].

- *відкриті комплексні спортивні споруди:* енергоспоживання даних об'єктів значною мірою залежить від графіка проведення спортивних заходів, сезону та типу інженерних систем. У таких об'єктах суттєвими споживачами енергії є системи освітлення, особливо у вечірні години [4]. Це свідчить, що штучне освітлення залишається визначальним чинником загального енергоспоживання та належить до головних енергоспоживачів таких видів споруд.

В результа проведено дослідження та аналізу джерел слід виділено наступні групи споживачів у спортивних спорудах:

- Системи опалення, вентиляція, кондиціонування: забезпечують мікроклімат, притік свіжого повітря, управління вологістю;

- Систему освітлення (зовнішнє, внутрішнє освітлення): велика частина електроспоживання в залах і стадіонах;
- Технології нагрівання води, повітря, підлоги та підігрів басейнів: в плавальних басейнах становить значну питому частку теплового навантаження;
- Насоси і циркуляційні системи: для басейнів, систем опалення та водопостачання.

У таблиці 1 наведено узагальнені результати аналізу суттєвих споживачів енергії спортивних споруд за призначенням.

Таблиця 1 - Суттєві споживачі енергії спортивних споруд .

Вид енергетичної потреби	Рівень потреби	Частка в енерго-балансі, %	Призначення/використання
Опалення приміщень	Високий	40–60	Через великі об'єми приміщень споруд
Холодильне обладнання	Високий	40–45	Визначний споживач енергії у льодових аренах
Освітлення	Середній	20–30	Освітлення спортивних залів, трибун, приміщень
Нагрів води	Середній	10–20	Для басейнів, душових та саун
Вентиляція та обробка повітря	Низький	5–10	Забезпечення свіжого повітря в спорудах

Висновки. Проведений аналіз спортивних споруд показав значні відмінності у структурі їх енергоспоживання залежно від типу об'єкта та режиму експлуатації. Льодові арени характеризуються найбільшими витратами енергії на охолодження, тоді як у басейнах домінує споживання теплової енергії для підігріву води. Універсальні спортивні зали мають переважно теплові навантаження через опалення приміщень, тоді як на стадіонах головним споживачем залишається система освітлення. Такі результати свідчать про необхідність різного підходу під час проведення енергоаудиту та впровадження енергоефективних технологій для кожного виду спортивної споруди.

Список використаної літератури

1. Hemati, P.; Montagud-Montalvá, C.I.; Sawalha, S. Comparative Analysis of Modern Energy Systems for Ice Rinks. Master's Thesis, Energy Technologies for Sustainable Development, Valencia, Spain, September 2023.
2. Cardoso, B.J.; Gaspar, A.R.; Góis, J.C.; Rodrigues, E. Energy and water consumption characterization of portuguese indoor swimming pools. In Proceedings of the CYTEF 2018 VII Congreso Ibérico, Ciencias Y Técnicas del Frío, Valencia, Spain, 19–21 June 2018.
3. Katsaprakakis, D. A., Papadakis, N., Giannopoulou, E., Yiannakoudakis, Y., Zidianakis, G., Katziagiannakis, G., Dakanali, E., Stavarakakis, G. M., & Kartalidis, A. (2023). Rational Use of Energy in Sport Centers to Achieving Net Zero—The SAVE Project (Part B: Indoor Sports Hall). *Energies*, 16(21), 7308. <https://doi.org/10.3390/en16217308>.
4. Katsaprakakis, D.A. Computational Simulation and Dimensioning of Solar-Combi Systems for Large-Size Sports Facilities: A Case Study for the Pancretan Stadium, Crete, Greece. *Energies* 2020, 13, 2285.

БАР'ЄРИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ПОПИТОМ В УКРАЇНИ

Вступ. У сучасних енергетичних системах, що переходять до моделі з високою часткою відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), управління попитом (Demand Side Management, DSM) та реагування на попит (Demand Response, DR) відіграють ключову роль у забезпеченні гнучкості, стабільності та економічної ефективності функціонування ринку. Ці інструменти дозволяють збалансувати попит і пропозицію без необхідності розбудови нових генеруючих потужностей, що особливо актуально для енергосистем з нестабільною генерацією з ВДЕ.

DSM дає змогу кінцевим споживачам брати активну участь у ринку електроенергії, оптимізуючи власне споживання, знижуючи пікові навантаження та підвищуючи ефективність використання ресурсів. Як свідчить досвід країн ЄС, інтеграція DSM у ринкові механізми дозволяє підвищити надійність енергопостачання та знизити загальні витрати на балансування системи [2].

В Україні концепція управління попитом лише починає формуватись. Попри наявність стратегічних документів щодо цифровізації енергетики та розвитку Smart Grid, практичне впровадження DSM обмежене низкою економічних, технічних та поведінкових бар'єрів. Вивчення цих перешкод і пошук шляхів їх подолання є важливою умовою переходу до кліматично нейтральної, конкурентної та орієнтованої на споживача енергосистеми.

Метою даної роботи є аналіз основних бар'єрів, що стримують впровадження систем управління попитом в Україні, та визначення перспектив їх подолання у контексті європейських тенденцій.

Основними завданнями дослідження є:

1. Ідентифікувати економічні, технічні та поведінкові бар'єри розвитку DSM.
2. Проаналізувати чинники, що обмежують участь побутових і комерційних споживачів у програмах Demand Response.
3. Оцінити можливості адаптації міжнародного досвіду до українських умов.
4. Сформулювати рекомендації щодо політичних, технічних та інформаційних заходів для стимулювання розвитку DSM.

Матеріал дослідження

1. Економічні бар'єри

Одним із головних викликів є відсутність ефективних ринкових стимулів для споживачів, які могли б компенсувати участь у програмах управління попитом. Як зазначає Міжнародне енергетичне агентство [3], більшість кінцевих користувачів не бачать прямої економічної вигоди від зміни своїх моделей споживання, оскільки тарифи не відображають реальних коливань вартості електроенергії протягом доби.

Додатковою проблемою є нерозвиненість тарифної політики. Відсутність динамічного ціноутворення (time-of-use, real-time pricing) унеможливорює гнучке реагування споживачів на ринкові сигнали. У країнах ЄС перехід до погодинних тарифів та механізмів “smart billing” став поштовхом до активізації програм DR, проте в Україні рівень лібералізації роздрібного ринку залишається низьким.

Аналітика Центру Разумкова [1] підкреслює, що відсутні економічні стимули для побутових і малих бізнес-споживачів, які могли б брати участь у програмах DSM. Сучасна тарифна структура не стимулює операторів систем розподілу інвестувати у цифрову інфраструктуру, що також гальмує розвиток локальних рішень з управління попитом. У результаті — формується “замкнене коло”: відсутність вигоди → низька участь → відсутність даних → відсутність інвестицій.

2. Технічні бар'єри

З технічного боку, основним обмеженням є недорозвиненість інфраструктури, здатної підтримувати двосторонній обмін даними між споживачами, операторами та ринковими платформами. Як зазначає ENTSO-E [2], реалізація DR неможлива без впровадження інтелектуальних мереж (Smart Grids), розумних лічильників (smart meters) і цифрових платформ для обміну даними в реальному часі.

В Україні рівень проникнення таких технологій поки що мінімальний. За даними державних операторів, лише невелика частка домогосподарств обладнана smart-лічильниками, а автоматизовані системи управління навантаженням застосовуються переважно у промисловості.

Іншою проблемою є нестача гнучкості на рівні генерації та споживання. Через обмежену кількість систем накопичення енергії та відсутність інтегрованих платформ керування навантаженнями оператори систем передачі змушені підтримувати резервні потужності, що підвищує витрати.

Дослідження Smart Grid and Renewable Energy Journal [4] наголошує, що відсутність стандартів сумісності обладнання і централізованих протоколів комунікації створює ризики фрагментованого розвитку. Ситуація ускладнюється також тим, що на ринку представлено різні моделі лічильників і контролерів, які не завжди можуть працювати у єдиній екосистемі. Це перешкоджає створенню повноцінних “розумних” енергетичних мереж.

3. Поведінкові та соціальні бар'єри

Поведінкові чинники відіграють не менш важливу роль, ніж технічні. За дослідженням OECD/IEA [3], більшість користувачів не готові змінювати свої звички споживання енергії через низький рівень поінформованості та відсутність довіри до нових технологій.

В українських реаліях ця проблема посилюється недостатністю просвітницьких кампаній і брак інформаційних ресурсів, що пояснюють принципи роботи систем DSM. Навіть серед зацікавлених споживачів існує нерозуміння механізму винагороди за участь у програмах DR.

Окремим фактором є низький рівень цифрової грамотності населення та страх перед “автоматизованим контролем” над побутовими приладами. Як показують опитування [1], користувачі часто не довіряють енергетичним компаніям щодо безпеки даних і не готові надавати доступ до споживчих профілів. Така поведінкова інерція зменшує потенціал масового впровадження HEMS/BEMS-рішень.

4. Шляхи подолання бар'єрів

Для вирішення цих проблем експерти ENTSO-E [2] пропонують інтегрований підхід, який передбачає розвиток ринку гнучкості, створення цифрових стандартів і забезпечення рівного доступу до енергетичних даних для всіх учасників ринку.

На міжнародному рівні позитивний досвід демонструють Німеччина, Нідерланди та Данія, де впровадження DSM супроводжувалось державними пілотними програмами, субсидіями на smart-обладнання та навчальними кампаніями для населення.

Для України, за оцінкою експертів Центру Разумкова [1], першочерговим є створення національної програми з управління попитом, яка б об'єднала регулятора, операторів систем розподілу, бізнес і споживачів. Програма має включати:

- розробку нормативно-правової бази;
- впровадження динамічних тарифів з поступовою лібералізацією;
- державну підтримку інвестицій у Smart Grid-інфраструктуру;
- інформаційно-освітні кампанії.

З технічного боку, необхідно модернізувати мережі, інтегрувати системи накопичення енергії та автоматизовані платформи керування навантаженнями. Це забезпечить прозорість та ефективність обміну даними між операторами і споживачами.

З поведінкової точки зору, важливим кроком стане формування енергетичної культури споживання через навчальні ініціативи, роз'яснювальні кампанії та демонстраційні пілотні

проекти з HEMS-технологіями. Поступове підвищення рівня довіри до цифрових інструментів може стати рушійною силою зміни поведінки користувачів.

Висновки. Отже, впровадження систем управління попитом в Україні стикається з трьома основними групами бар'єрів — економічними, технічними та поведінковими.

1. Економічні бар'єри зумовлені відсутністю гнучких тарифів і ринкових стимулів, що стримує участь споживачів і операторів у програмах DSM.
2. Технічні перешкоди пов'язані з браком інфраструктури, цифрових стандартів і систем обміну даними, що обмежує інтеграцію Smart Grid-технологій.
3. Поведінкові чинники відображають низький рівень обізнаності, довіри та готовності населення до цифрової трансформації енергетики.

Подолання цих бар'єрів вимагає системного підходу, що поєднує економічні стимули, технологічні інновації та соціальну взаємодію. Україна має всі передумови для поступового переходу до моделі “гнучкого споживача”, якщо державна політика та ринкові механізми будуть узгоджені з європейськими принципами відкритості, взаємодії та кліматичної нейтральності.

Список використаної літератури

1. Центр Разумкова. Впровадження системи управління попитом електроенергії в Україні (частина 1: огляд світових практик). – Київ, 2024. – URL: <https://razumkov.org.ua/statti/vprovadzhennia-systemy-upravlinnia-popytom-elektroenergii-v-ukraini-chastyna-1-ogliad-svitovykh-praktyk>.
2. ENTSO-E. Demand Side Response Policy Paper. – Brussels, 2021. – URL: https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/Publications/Position%20papers%20and%20reports/entsoe_pp_dsr_web.pdf.
3. OECD/IEA. Empowering Customer Choice in Electricity Markets: Demand Response and Smart Grids. – Paris: OECD/IEA Publishing, 2011. – 78 p. – URL: https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2011/10/empowering-customer-choice-in-electricity-markets_g17a2030/5kg3n27x4v41-en.pdf.
4. Siano P. Demand Response and Smart Grids — A Survey // Smart Grid and Renewable Energy. – 2012. – Vol. 3(4). – P. 391–400. – URL: https://www.scirp.org/pdf/SGRE20120400013_39342756.pdf.

МАЛА ВІТРОГЕНЕРАЦІЯ З УРАХУВАННЯМ ВИМОГ СТАНДАРТУ NZEB

Актуальним завданням українського енергоменеджменту щодо збереження енергоресурсів є енергоефективна експлуатація громадських будівель, оскільки такі об'єкти характеризуються високим рівнем споживання енергії. Особливої уваги заслуговують будівлі, що належать державним органам, адже вони повинні бути прикладом, демонструючи, що екологічні та енергетичні фактори враховуються.

На шляху до вирішення цієї проблеми в Україні важливого значення набуває впровадження стандарту будинків з близьким до нульового рівнем споживання енергії, так звані NZEB (Nearly Zero Energy Buildings) [1]. Будівля NZEB визначається в Директиві щодо енергоефективності будівель (EPBD) [2] як «будівля з дуже високою енергоефективністю» – коли майже нульова або дуже низька кількість необхідної енергії повинна покриватися в дуже значній мірі за рахунок відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) (вироблення здійснюється на місці або поблизу).

Існують різні типи локального постачання відновлюваної енергії, які розглядаються в кожному національному плані NZEB відповідно до географічного регіону та клімату кожної країни. Зокрема, на території України, з 1 квітня 2025 року набули чинності [3] нові «вимоги до будівель з близьким до нульового рівнем споживання енергії» та затверджено зміни до «Порядку проведення сертифікації енергетичної ефективності», що регулюють сертифікацію будівель за стандартом NZEB.

Пошук та запровадження нових енергонезалежних технологічних рішень для громадських будівель з урахуванням вимог стандарту NZEB – одна із нагальних науково-прикладних проблем, вирішення яких сприяє зростанню енергетичної стійкості нашої держави. При цьому методологія, що застосовується для визначення енергетичної ефективності будівлі, має бути відкритою для інновацій.

Аналітики вважають, що вітроенергетика в Україні може розвиватися швидше, ніж інші види ВДЕ. На користь такого погляду можна навести наступні аргументи:

- у порівнянні з фотоелектричними модулями, при однаковій потужності, вітроустановки займають меншу площу і коштують набагато дешевше;
- через велику площу забудови та крихкість фотоелектричних модулів сонячні електростанції є більш вразливими до обстрілів;
- вітрові турбіни можуть генерувати електроенергію в різний час доби та року;
- встановлення вітрових турбін на будівлях в Україні залежить від їх висоти (турбіни заввишки до трьох метрів зазвичай не потребують дозволу).

Мета дослідження – визначення потенціалу малої вітрогенерації з урахуванням вимог стандарту NZEB для громадської будівлі (м. Київ) 2004 року побудови. Будівля – дев'ятиповерхова, містить цокольне приміщення. Розташована «на схилі» та знаходиться у І кліматичній зоні України. Характерною особливістю є відсутність перешкод для потоків вітру в околі будівлі на висоті шостого поверху та вище. Обсяг середньодобового споживання будівлею електроенергії: 69 кВт. Цей показник становить 72% від загальних витрат на енергопотреби будівлі.

Згідно розділу V вимог до будівель з близьким до нульового рівнем споживання енергії [3]: «частка енергії, вироблена з ВДЕ, яка споживається на потреби опалення та охолодження будівлі, має становити не менше ніж 53 % для І температурної зони».

З урахуванням стандарту NZEB, за бажаний показник потенціалу малої вітрогенерації прийнято 55% від загальних середньодобових витрат на енергопотреби даної будівлі (52,71 кВт). Для дослідження використано середньодобові значення швидкості вітру для

репрезентативної дати 14.09.2025 р. (метеодані взято для висоти 10 м). Очевидно, що із збільшенням висоти зменшується вплив підстильної поверхні, вітровий потік стає сталішим, а швидкість вітру вищою [4]. Рівень вітропотенціалу можна оцінити, визначивши величину питомої потужності вітрового потоку для заданої висоти (10 м) при заданих параметрах вітрових турбін: з вертикальною віссю [5] (тип-1); з горизонтальною віссю [6] (тип-2). На основі рівняння Беца змодельовано потужність добового виробітку на вказану дату кожної з вітрових турбін: тип-1 – 20,798 кВт; тип-2 – 1,104 кВт. Результати погодинного розрахунку залежності $P(t)$ продемонстровано на рис.1.

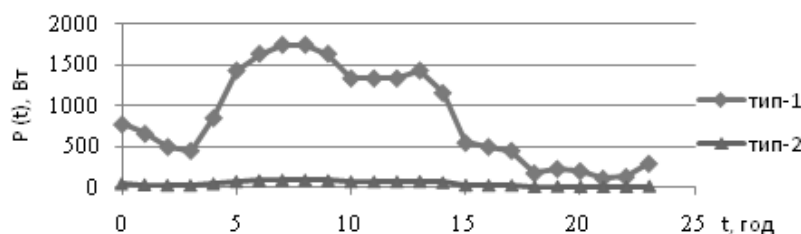


Рис.1. Профілі потужності добового виробітку для турбін двох типів

При розрахунку допустимої кількості вітрогенераторів з метою максимальної економії висунуто вимогу: врахувати варіанти розміщення їх на вже існуючих конструкціях будівлі (зокрема, тип-1 – на даху загальною площею 279,5 м²; тип-2 – на балконних огороженнях від шостого до дев'ятого поверхів).

Оскільки вертикальне розташування та інтелектуальне керування лопатями зменшують зношуваність, тим самим подовжуючи термін служби турбіни та знижуючи загальні витрати, то надано перевагу турбінам типу-1. Враховуючи, що мінімальна відстань між вітрогенераторами в єдиній енергетичній системі повинна бути не менше їх потрійної висоти (9 м), визначено максимально можливу для встановлення кількість вітрогенераторів – 6 одиниць. Це гарантує добовий виробіток 124,788 кВт енергії, що перевищує більше, ніж у два рази запланований у відповідності до вимог стандарту NZEB показник 52,71 кВт. Таким чином, припущення щодо перспектив використання малої вітрогенерації для задоволення енергопотреб даної будівлі – підтверджено.

Список використаної літератури

1. Шалімов П. Аналітичний звіт «Огляд вимог NZEB у Європі». – Київ, 2024. – 59 с.
2. Директива про енергетичну ефективність будівель URL: <http://data.europa.eu/eli/dir/2010/31/2021-01-01>
3. Вимоги до будівель з близьким до нульового рівнем споживання енергії URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0284-25#n15>
4. Молодан, Я. Сучасні підходи до оцінки та аналізу основних вітрових характеристик для цілей вітроенергетики. // Проблеми безперервної географічної освіти і картографії. – 2023. – №18. – С. 115-120.
5. Про унікальний італійські розробки URL: <https://interestingengineering.com/energy/italys-unique-wind-turbines>
6. Американський сайт промислових пропозицій вітрогенераторів URL: <https://windandsolar.com/products/raptor-g4-5-blade-500-watt-basic-wind-turbine>

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ГІБРИДНИХ СИСТЕМ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗА РАХУНОК ЗАСТОСУВАННЯ УСТАНОВОК ЗБЕРІГАННЯ ЕНЕРГІЇ

Перехід до відновлювальних джерел енергії (ВДЕ) є ключовим напрямом сталого розвитку енергетики. Проте їхня нестабільність та залежність від погодних умов створюють виклики для забезпечення надійності та безперервності електропостачання. Тому останніми роками значної уваги набули гібридні енергетичні системи, які поєднують генерацію від традиційних та відновлювальних джерел. Важливу роль у таких системах відіграють установки зберігання електроенергії (УЗЕ), що дозволяють збалансувати виробництво та споживання, підвищення енергоефективності і зменшити навантаження на мережу [1]. Метою дослідження є підвищення ефективності функціонування гібридних систем енергозабезпечення за рахунок оптимального використання УЗЕ.

Матеріали і результати дослідження

Ціллю дослідження було встановити, ефективність використання УЗЕ на промислових підприємствах у Зауерланд, Північний Рейн-Вестфалія, Німеччина. Попередньо було проведено дослідження доцільності використання різних технологій акумуляторних батарей, лідерами стали літій-іонні акумулятори, що використовуються в електромобілях та можуть бути адаптовані для зберігання електричної енергії у промислових масштабах та LiFePO_4 акумулятори, які зазвичай створені конкретно для промислового зберігання енергії, мають модульний вигляд та порівняно компактні. Після проведеного аналізу для подальшого порівняння була обрана LFP технологія. На даний момент вона є найбільш стабільною та доступною в Україні та світі [2].

Наступним кроком було визначено варіанти моделей для порівняння, за основу взято підприємство, яке на даний час не має встановлених ВДЕ або УЗЕ. Для проведення моделювання було прийнято припущення, що орієнтовно 40 % загальної площі може бути використано для встановлення сонячних фотомодулів. Такий показник відповідає середньостатистичним технічним можливостям у промисловій забудові. Розрахунок допустимої площі проведено з урахуванням вимог до розташування панелей, їх взаємного затінення та інсоляційних умов регіону.

Для розрахунків було обрано два типових об'єкти: підприємство №1 із загальною площею 160 000 м² та підприємство №2 із площею 370 000 м². Такі показники є репрезентативними для середніх і великих промислових комплексів із розвиненою інфраструктурою. Сумарне річне споживання електроенергії для обох підприємств становить 34 182 798 кВт·год, що відповідає середнім значенням для підприємств машинобудівного або металургійного профілю в умовах постійного виробничого циклу.

З метою підвищення точності аналізу навантаження використовувалися типові 15-хвилинні графіки споживання, що узгоджуються з вимогами європейського ринку електроенергії ENTSO-E, де облік та торгівля електричною енергією здійснюються саме з таким часовим інтервалом. Це дозволило врахувати динаміку зміни навантаження протягом доби, виявити пікові та провальні періоди споживання, а також адаптувати алгоритм управління установкою зберігання енергії до реальних ринкових умов. Розрахунки виконувалися в автоматизованому режимі з використанням моделей прогнозування попиту і генерації.

Ємність УЗЕ обрана на рівні 80 МВт·год, при цьому номінальна потужність становила 30 МВт. Таке співвідношення забезпечує баланс між тривалістю роботи УЗЕ в автономному режимі та можливістю швидкого реагування на коливання навантаження або цінових сигналів ринку. УЗЕ реалізовано у вигляді модульних блоків, розміщених у 40-футових контейнерах, кожен з яких має ємність близько 1 МВт·год. Контейнерне виконання забезпечує високу мобільність, зручність монтажу та можливість поетапного нарощування потужності системи без необхідності повної модернізації інфраструктури електропостачання підприємства.

Наступним кроком було змодельовано 4 варіанти роботи підприємства, з різними рівнями ефективності енергетичної системи підприємства.

Для оцінювання ефективності використання сонячної генерації у структурі гібридної системи доцільно враховувати показники самоспоживання (Self-Consumption) та самозабезпеченості (Self-Sufficiency), які визначаються співвідношенням між виробленою, спожитою та закупленою електроенергією. Показник самоспоживання розраховуються як:

$$SC = \frac{\sum PV_{com}}{\sum PV},$$

де PV_{com} - обсяг генерації фотоелектричних установок, безпосередньо спожитий самим підприємством, а PV - загальний обсяг виробленої електроенергії від фотоелектричних модулів.

Показник самозабезпеченості визначається як частка власної генерації у загальному енергоспоживанні підприємства:

$$SS = \frac{\sum PV_{com}}{\sum Load},$$

де $Load$ - сумарне споживання електроенергії підприємством протягом аналізованого періоду.

Таким чином, параметр SC характеризує ступінь ефективності використання виробленої фотоелектричної енергії для власних потреб без її експорту до мережі, тоді як SS показує, наскільки підприємство є енергетично незалежним від зовнішніх джерел постачання. Оптимізація цих двох показників дозволяє визначити раціональну потужність фотоелектричної установки та обсяг ємності УЗЕ, що забезпечують максимальну економічну доцільність інвестицій [3][4].

Найбільш ефективним виявився варіант, коли УЗЕ накопичують надлишкову сонячну генерацію протягом дня, а вночі, коли ціни на електроенергію найнижчі, система автоматично накопичує ємність, яку розрахунково має витратити підприємство за наступну добу. За допомогою розробленого алгоритму, система визначає графіки цін на наступну добу, порівнює їх з прогнозами на сонячну генерацію та дає змогу отримувати значення при яких потрібно дозарядити УЗЕ під час дешевих годин і тим самим знизити витрати підприємства на купівлю електроенергії. Результати розрахунків представлені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Порівняння варіантів системи енергозабезпечення із використанням УЗЕ

	Без гібридної системи	З сонячними панелями	Гібридна система з використанням УЗЕ лише для накопичення надлишку генерації у УЗЕ	Гібридна система, що прогнозує денну генерацію та дозаряджає нестачу в УЗЕ в «дешеві години» доби
Вартість електроенергії	17 030 451,74	8 643 986,51	7 923 849,84	5 825 969,77
Відсоток витрат на електроенергію по відношенню до базового варіанту	100%	50,76%	46,53%	34,21%

Застосування представленого алгоритму керування, який враховує добові коливання цін і прогноз сонячної генерації, забезпечило зменшення річних витрат на електроенергію до 66 % і термін окупності близько одного року.

Висновки. Інтеграція УЗЕ у гібридні енергосистеми є одним з найефективніших способів підвищення їх надійності та економічності. Проведені дослідження підтвердили, що LiFePO₄ модулі забезпечують найкращі енергетичні показники відносно вартості вставлення порівняно з іншими конкурентами. При використанні в умовах європейського ринку електроенергії строк окупності складає приблизно 1 рік, при умові, що на даний момент ціни на українському ринку на приблизно 20-30% вищі ніж в Європі, то і строк окупності складе приблизно 9-10 місяців. Застосування сучасних рішень у цій сфері створює передумови для побудови гнучких, розподілених та стійких до зовнішніх впливів енергетичних систем.

Список використаних літератури

1. Prytskach, I., Opryshko, V., Veremiichuk, Y., and Yarmoliuk, O., Battery Energy Storage Systems: Enabling Ukraine's Grid Flexibility and Energy Security through Ancillary Services, Systems, Decision and Control in Energy VI. Volume II: Power Engineering and Environmental Safety, Switzerland: Springer Cham, Vol. 552. pp 3–36, 2024, <https://doi.org/10.1007/978-3-031-67091-6>
2. Mohammad Amir, Radhika G. Deshmukh, Haris M. Khalid, Zafar Said, Ali Raza, S.M. Muyeen, Abdul-Sattar Nizami, Rajvikram Madurai Elavarasan, R. Saidur, Kamaruzzaman Sopian, Energy storage technologies: An integrated survey of developments, global economical/environmental effects, optimal scheduling model, and sustainable adaption policies, Journal of Energy Storage, Volume 72, Part E, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108694>
3. Muhammad Tabish Parray, Thomas Martinsen, Multi-year analysis for optimal behind-the-meter battery storage sizing and scheduling: A Norwegian case study, Journal of Energy Storage, Volume 110, 2025, <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.115304>
4. Solomon Evro, Abdurahman Ajumobi, Darrell Mayon, Olusegun Stanley Tomomewo, Navigating battery choices: A comparative study of lithium iron phosphate and nickel manganese cobalt battery technologies, Future Batteries, Volume 4, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.fub.2024.100007>

АВТОМАТИЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯМ У ГІБРИДНІЙ ЕНЕРГЕТИЧНІЙ УСТАНОВЦІ НА ОСНОВІ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ

У сучасному світі стрімкий розвиток відновлюваних джерел енергії, зокрема сонячної енергетики, зумовлює зростання інтересу до створення енергоефективних та екологічно безпечних систем живлення. Впровадження гібридних енергетичних установок, що поєднують сонячні панелі, акумулятори та резервні джерела, є перспективним напрямом забезпечення стабільного електропостачання. Ефективне функціонування таких систем потребує впровадження автоматизованих систем керування, що реагують на зміни енергоспоживання, погоду, стан накопичувачів енергії.

Актуальність теми полягає в потребі в автономних і надійних джерелах живлення, в регіонах з нестабільним електропостачанням або в умовах енергетичних криз. Гібридні системи на основі сонячних панелей дозволяють зменшити залежність від централізованих мереж та оптимізувати витрати на енергоресурси. Автоматизація керування у таких установках забезпечує високу енергоефективність, раціональне використання наявних ресурсів та забезпечення безперебійної роботи споживачів.

Одним із найрозповсюдженіших способів автономного електроживлення є використання бензинових чи дизельних генераторів. Хоча такі системи здатні забезпечити стабільне постачання електроенергії в умовах відсутності мережі, вони мають цілий ряд недоліків: високу вартість експлуатації, залежність від пального, обмежений моторесурс, значний шум, шкідливий вплив викидів на довкілля. Водночас, використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), зокрема сонячної енергії, набирає популярності завдяки зниженню вартості обладнання, екологічності та можливості децентралізації енергопостачання. [2]

Системи, що базуються на сонячних панелях, генерують енергію безпосередньо від сонячного випромінювання. Цей процес залежить від погодних умов, пори року, географічного розташування, рівня хмарності та часу доби. Така нестабільність вимагає або значних запасів накопичувальної потужності (акумуляторних батарей), або використання додаткових джерел живлення — так званих гібридних рішень.

Електроспоживання, як правило, носить циклічний і часто імпульсний характер: різке збільшення навантаження у вечірній час, робота потужних пристроїв, запуск насосів тощо. У свою чергу, генерація енергії від ВДЕ відбувається за іншими законами — рівномірна вдень і відсутня вночі. Така невідповідність між споживанням та генерацією енергії призводить до енергетичних дисбалансів, що вимагають складних рішень у сфері керування накопиченням, розподілом і резервуванням енергії.

Ще однією проблемою є неефективне використання надлишкової енергії, через обмежену ємність акумуляторів або відсутність розумного управління. Крім того, акумулятори мають обмежений термін служби, що скорочується при частому глибокому розряді або надмірному заряді, викликаних відсутністю інтелектуального контролю.

Традиційні системи автономного живлення часто не оснащені засобами автоматизації або моніторингу і не можуть ефективно інтегруватися в сучасні розумні будівлі чи промислові об'єкти. При зміні навантаження або несправності у системі оператор втручається вручну, що підвищує ризик збоїв, втрати енергії або пошкодження обладнання.

У відповідь на ці виклики розробляються гібридні енергетичні установки, дивитись Рисунок 1, які поєднують кілька джерел живлення — наприклад, сонячні панелі, акумуляторні батареї та дизельний генератор.[1]



Рисунок 1 – Зовнішній вигляд гібридних енергетичних установок

Проте ефективне функціонування такої установки можливе лише за умови впровадження автоматизованої системи керування, яка в реальному часі аналізує енергетичний баланс, прогнозує навантаження, керує зарядом/розрядом батарей та здійснює автоматичне перемикання між джерелами живлення. Це дозволяє досягти максимального використання відновлюваних джерел, мінімізувати витрати палива та забезпечити стабільну роботу споживачів незалежно від зовнішніх факторів. Гібридні установки в собі поєднують багато функцій, дивитись Таблиця 1.

Таблиця 1 - Функціональні компоненти гібридної системи електроживлення

№	Компонент	Функція
1	Сонячні панелі	Генерація енергії вдень
2	Акумуляторні батареї	Накопичення та використання енергії вночі або при піковому навантаженні
3	Дизельний генератор	Резервне джерело при нестачі енергії
4	Контролер	Координація роботи всіх компонентів

Автоматизація є ключовим фактором підвищення ефективності автономного електроживлення. Вона дозволяє створити інтелектуальні системи, здатні до самостійного прийняття рішень, оптимізації роботи обладнання та гнучкого реагування на зміни умов. У майбутньому саме автоматизовані гібридні енергетичні установки стануть основою енергетичної незалежності для об'єктів різного масштабу — від приватних домогосподарств до промислових підприємств.[3]

Список використаних літератури

1. Портал "GreenPost", Новини відновлюваної енергетики: URL: <https://greenpost.ua>
2. Сапронов В. Г. Автоматизовані системи керування: навч. посіб. Львів: Видавництво ЛНУ, 2021. 256 с.
3. Сучасні тенденції розвитку відновлюваної енергетики в Україні, Енергетика України. 2022. № 3. С. 18–24.

ФОРМУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ПОРТФЕЛЯ УКРАЇНИ НА ОСНОВІ ІМПОРТНО-ЕКСПОРТНИХ ОПЕРАЦІЙ У КОНТЕКСТІ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ

Вступ. Енергетичний портфель України має формуватися з урахуванням реальних обмежень генерації, сезонної та погодинної волатильності попиту, а також інтеграції до європейського ринку. У такому контексті імпорт електроенергії є не просто страховкою на випадок дефіциту, а структурним інструментом керування ризиком, вирівнювання ціни та підвищення енергоефективності системи.

Потреба в імпорті зумовлена поєднанням факторів. Це воєнні та ремонтні обмеження генерації і мереж, швидка зміна структури генерації з високою часткою ВДЕ, територіальна нерівномірність навантаження, а також цінові перекоси між суміжними зонами. Імпорт виконує функцію ланки між внутрішнім попитом і доступним ресурсом сусідніх ринків, коли внутрішня маржинальна вартість електроенергії є найвищою.

Кожен учасник ринку електричної енергії повинен використовувати наявний інструмент імпорту, адже він дає конкретні вигоди різним ролям: трейдеру - для оптимізації середньої ціни портфеля через погодинний відбір вигідних періодів і зниження витрат на балансування, постачальнику - для підвищення надійності виконання графіків та зменшення ризику небалансів, великому споживачу - для стабілізації витрат виробництва та збереження безперервності технологічних процесів.

Мета роботи - обґрунтувати й розробити методику формування енергетичного портфеля України на основі імпортно-експортних операцій для забезпечення безперервності постачання, мінімізації середньої вартості електроенергії та підвищення енергоефективності системи в умовах волатильності й дефіциту.

Основними завданнями дослідження є:

5. Економічний аналіз імпортно-експортних операцій з позиції трейдера.
6. Оцінка доцільності імпорту для кінцевого споживача.
7. Розробка операційного плану дій для учасників ринку.
8. Формування рекомендацій з управління ризиками.

Матеріал дослідження:

Економічний аналіз імпортно-експортних операцій (позиція трейдера). Розгляд зосереджено на виявленні погодинних періодів, у яких імпорт або експорт створює додану вартість після урахування вартості доступу до перетинів та податкових складових. За результатами аналізу найбільш стабільні можливості фіксувалися на напрямках Україна-Румунія та Україна-Угорщина, переважно у вечірні та ранкові піки. Частка годин із позитивним фінансовим результатом змінювалася залежно від добового профілю попиту та доступності перетину, що підтверджує необхідність погодинного планування замість середніх фіксацій.

Доцільність імпорту для кінцевого споживача. Імпорт розглядався як інструмент забезпечення безперебійної роботи за умови дотримання погодинної частки постачання з-за кордону. У перевірених сценаріях підтримка необхідної частки імпорту давала можливість утримувати виробничі процеси без перерв і зменшувати ризик дорогих небалансів. Додаткові витрати на таку «гарантію безперервності» залишалися прийнятними відносно типової галузевої маржі, а отже обґрунтовувалися економічно для споживачів із безперервними технологічними циклами.

Операційний план дій для учасників ринку. Щоденно виконується: моніторинг аукціонів спільного та національного операторів доступу до перетинів, погодинне зіставлення внутрішніх цін із цінами суміжних зон, подання заявок на критичні години

дефіциту, формування плану закупівель із резервом на випадок скорочення доступної спроможності, корекції на внутрішньодобовому ринку та контроль небалансів. Щотижня переглядаються пороги прийняття рішень і оновлюються короткострокові прогнози попиту.

Рекомендації з управління ризиками та ефективністю. Пропонується правило трьох зон для рішень імпорту або експорту: безумовна дія за очевидної економічної переваги, дія за незначної переваги з урахуванням системної вигоди (уникнення небалансів, виконання вимог безперервності), відмова за відсутності економічного сенсу. Окремо контролюється ліквідність під графіки оплат і касові розриви, щотижня оновлюються порогові параметри та ризик-параметри, щомісяця переглядається стратегічна структура портфеля за напрямками. У результаті портфель з імпоротною складовою працює як інструмент стабілізації ціни та підвищення надійності постачання при зниженні операційних ризиків.

Висновки. Імпортно-експортні операції мають бути постійною частиною портфеля, адже у вибрані погодинні періоди вони створюють додану вартість і знижують витрати на балансування. Для кінцевого споживача імпорту працює як інструмент безперервності за прийнятних додаткових витрат, що зберігає стабільність технологічних процесів. Результат визначає операційна дисципліна з щоденним моніторингом аукціонів і цін суміжних зон, цілеспрямованими заявками на критичні години, своєчасними корекціями на внутрішньодобовому ринку та постійним контролем небалансів. Ефективне управління ризиками означає не «перезакривати» портфель надто довгими фіксованими закупівлями і не залишати надто велику частку обсягів без захисту від цінових коливань, а також обмежувати купівлю прав на перетин тоді, коли вони надто дорогі.

Список використаних літератури

1. ENTSO-E Transparency Platform. Cross-Border Capacities and Flows. - URL: <https://transparency.entsoe.eu/>
2. Joint Allocation Office (JAO). Daily Capacity Allocation and Auction Rules. - URL: <https://www.jao.eu/>
3. НЕК «Укренерго». Електронний аукціонний портал (ЕАП) з розподілу пропускної спроможності. - URL: <https://eap.ua.energy/>
4. НКРЕКП. Правила ринку електричної енергії та балансуючий ринок. - URL: <https://www.nerc.gov.ua/>
5. Кабінет Міністрів України. Постанови щодо імпорту електроенергії та безперервності постачання. - URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1127-2023-%D0%BF#Text>
6. ACER. REMIT Guidance on the application of Regulation (EU) No 1227/2011. - URL: <https://www.acer.europa.eu/>

ДОВГОСТРОКОВІ ДВОСТОРОННІ КОНТРАКТИ ЯК ІНСТРУМЕНТ ПІДВИЩЕННЯ СТАБІЛЬНОСТІ ТА ПРОГНОЗОВАНOSTІ РИНКУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ УКРАЇНИ В КРИЗОВИХ УМОВАХ

Вступ. Кризові умови роботи енергосистеми України підсилюють волатильність цін і ускладнюють планування, тому учасникам потрібні інструменти, що зменшують невизначеність і забезпечують передбачувані грошові потоки. Довгострокові двосторонні контракти виконують цю роль, поєднуючи фіксовану або індексну логіку ціни з чітко узгодженими обсягами, графіками постачання та правилами корекцій. Для постачальників це основа портфельного хеджування, яке стабілізує витрати й знижує ризик небалансів, тоді як для промислових споживачів це інструмент захисту бюджетів і уникнення зупинок під час пікових коливань. Для системи загалом такі договори створюють більш рівномірне завантаження та кращі умови для ремонтів і операційного планування. За умов інтеграції з європейськими правилами саме продуманий дизайн довгострокових контрактів і їх поєднання з короткими продуктами визначають стабільність і прогнозованість ринку.

Мета роботи. Показати, як довгострокові двосторонні контракти підвищують стабільність і прогнозованість ринку в кризових умовах, та обґрунтувати їх дизайн і місце у закупівельному портфелі на базі реальних результатів торгів і практик індексації.

Основними завданнями дослідження: описати сегменти ринку з акцентом на двосторонні договори і їх індексаційні підходи. Проаналізувати поведінку цін і маржинальність різних строків постачання за результатами біржових аукціонів. Оцінити ризики ліквідності й касових розривів у довгих та коротких продуктах. Сформулювати рекомендації щодо умов довгострокових контрактів у кризовий час.

Матеріал дослідження. Двосторонні договори укладаються як за фіксованою ціною, так і за індексною формулою з прив'язкою до середньої ціни ринку на добу наперед за період постачання. Така формула забезпечує прозорість і прогнозованість розрахунків, коректно відображає погодинну структуру навантаження та знижує кількість спорів щодо «справедливої» ціни. Ризики перерозподіляються між сторонами: короткострокова волатильність частково переходить до споживача через індекс, профільний ризик і небаланси вимагають від постачальника активної роботи на внутрішньодобовому ринку, а низька ліквідність окремих годин може підвищувати вартість корекцій.

Аналіз вибірки торгів показує, що прибутковість закупівель чутлива до строку продукту та ринкового фону. Виявлено як від'ємні серії результатів, так і «високі хвости» позитивної маржинальності у періоди напруженої системної ситуації. Максимальне позитивне відхилення індикативів від середньої ціни ринку на добу наперед у вибірці сягало кількох десятків відсотків на користь покупця, водночас існували серії зі стійким негативним результатом. За порівнянням різнострокових пропозицій у розглянутому періоді середні значення свідчили на користь коротших періодів, тоді як довші продукти давали нижчу середню маржу, зате забезпечували вищий рівень передбачуваності. Це підкреслює необхідність поєднання строків у портфелі та селективності закупівель залежно від ринкових фаз.

Графіки оплат з передоплатними режимами на кшталт D-3 формують специфічний тиск на обіговий капітал, особливо у п'ятничні дні з потрійними платіжними навантаженнями. Моделювання кумулятивних потоків для збиткового місячного періоду показало, що без достатнього страхового буфера учасник постійно перебуває в зоні негативного грошового балансу, а критична точка касового розриву може наближатися до фінального збитку за контрактом. У кризові періоди це створює ризик вимивання ліквідності навіть для портфелів

з помірною середньою маржою. Нові вимоги біржі щодо застави під виконання, запроваджені у відсотках від вартості контракту, частково дисциплінують ринок, але водночас підвищують потребу в оборотних коштах і роблять ціну помилки суттєвою.

У періоди підвищеної невизначеності довгострокові контракти доцільно оформлювати з індексною логікою ціни, ціновими межами на період, прописаними толерансами обсягу та прозорими правилами корекцій і претензій. Це дає можливість поєднати базову фіксацію витрат із автоматичним відображенням ринкових змін та зменшує конфліктність у розрахунках. З погляду портфельного менеджменту оптимально комбінувати довші покриття для базового навантаження і коротші серії для оперативної адаптації до поточної кон'юнктури, одночасно підтримуючи ліквідні буфери під графіки оплат і ймовірні затримки розрахунків. Такі умови підвищують стабільність ціни, знижують ризик небалансів і спрощують планування для споживачів з безперервними технологіями.

Висновки. Довгострокові двосторонні контракти є центральним інструментом зниження невизначеності й підвищення прогнозованості на ринку електроенергії в кризових умовах. Вони працюють найкраще у поєднанні з індексацією до публічного індикатора, ціновими межами та чіткими операційними правилами, а їхня результативність зростає за наявності дисципліни в управлінні ліквідністю і збалансованого міксу строків постачання в портфелі. Для постачальника це означає керованіший ризик і прозорі відносини зі споживачем, для промисловості — стабільніші витрати і менше зупинок процесів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. НКРЕКП. Постанова № 308 від 14.03.2018 «Про затвердження Правил ринку „на добу наперед“ та внутрішньодобового ринку». – URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/v0308874-18>
2. НКРЕКП. Постанова № 312 від 14.03.2018 «Про затвердження Правил роздрібного ринку електричної енергії». – URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/v0312874-18>
3. Міністерство енергетики України. Звіт про функціонування ринку електричної енергії в умовах воєнного стану, 2024 р. – URL: <https://mev.gov.ua/rubrika/pid-chas-voyennoho-stanu>
4. Українська енергетична біржа (УЕБ). Офіційний сайт. Розділ «Електрична енергія». – URL: <https://www.ueex.com.ua/>
5. Українська енергетична біржа. Календар торгів: Електрична енергія. – URL: <https://www.ueex.com.ua/auctions-calendar/elektrichna-energiya/>

ПІДХОДИ ДО ВИЗНАЧЕННЯ БАЗОВОГО РІВНЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ НА ПРОМИСЛОВИХ ОБ'ЄКТАХ

Вступ. У сучасному промисловому виробництві ефективне використання енергетичних ресурсів є ключовим фактором конкурентоспроможності компанії. Зростання вартості енергії, екологічні норми та міжнародні стандарти сприяють впровадженню систем енергоменеджменту. Ці системи спрямовані на підтримку сталого розвитку та підвищення енергоефективності виробництва. Для досягнення цієї мети необхідний системний підхід до управління енергією. Управління енергоспоживанням є складним процесом, оскільки воно включає багато взаємопов'язаних факторів. До них належать технологічні особливості процесів, стан обладнання та організація виробництва. Тому основною частиною енергоменеджменту є застосування системних принципів. Це включає планування, моніторинг та постійне вдосконалення процесів енергоспоживання [1].

Відповідно до міжнародного стандарту ISO 50001, управління енергоефективністю базується на циклі PDCA (Plan-Do-Check-Act), який підтримує постійне вдосконалення. На етапі планування проводиться енергетичний аналіз для оцінки моделей енергоспоживання. Цей аналіз визначає сезонні коливання, технологічні залежності та інші фактори, що впливають на використання енергії [2]. Однією з ключових можливостей енергетичного аналізу є встановлення базового енергоспоживання (БРЕ). Це показник, який описує типовий рівень енергоспоживання за нормальних умов експлуатації на підприємстві. БРЕ базується на фактичних даних за конкретний період і враховує різні фактори, що впливають на енергоспоживання [3].

Мета роботи. Дослідження має на меті вивчити сучасні методи визначення базового рівня енергоефективності на промислових об'єктах. Воно спрямовано на створення рекомендацій для практичного застосування з метою підвищення точності контролю енергоспоживання та ефективності використання енергії. У дослідженні розглядається питання оцінки методів встановлення базового рівня, їх критерії вибору, переваги та недоліки кожного підходу в реальних виробничих умовах.

Аналіз існуючих методів встановлення базового рівня.

Існує кілька методів визначення БРЕ, що відрізняються складністю, точністю та необхідними даними.

Статистичний метод базується на розрахунку середнього енергоспоживання за обраний період, зазвичай за рік. Він простий і дозволяє швидко виміряти базовий рівень. Однак він не враховує зміни обсягів виробництва та зовнішні фактори.

Регресійний метод включає побудову моделі енергоспоживання на основі ключових факторів, таких як обсяг виробництва, навантаження обладнання, температура тощо. Формула [4]:

$$E = a + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_nX_n$$

Динамічний базовий рівень дозволяє враховувати зміни виробничих умов.

Еталонний метод за основу порівняння враховує фактичне споживання з нормативами або аналогами в галузі; допомагає оцінити ефективність відносно кращих практик.

Балансовий метод ґрунтується на побудові енергетичного балансу підприємства з урахуванням усіх потоків та втрат, що дозволяє детально аналізувати структуру споживання, але потребує великого обсягу даних і часу.

Для наочного порівняння методів використовується таблиця:

Таблиця 1 – Порівняння підходів визначення БРЕ

Метод	Переваги	Недоліки	Використання
Статистичний	Простота та швидкість	Не враховує зміни виробництва та зовнішні фактори	Першочерговий аналіз, контроль результатів енергозбереження
Регресійний	Динамічний базовий рівень, корекція на фактори	Потребує якісних даних та математичної обробки	Аналіз змін енергоспоживання, прогнозування ефекту заходів
Еталонний	Оцінка ефективності щодо галузевих стандартів	Не враховує індивідуальні особливості підприємства	Бенчмаркінг, визначення потенціалу енергозбереження
Балансовий	Детальний аналіз структури споживання	Висока трудомісткість, потребує великого обсягу даних	Планування та оптимізація енергоспоживання

Вибір базового періоду. Вибір базового періоду [5] є важливим для встановлення надійної базової лінії енергоспоживання на промисловому об'єкті. Він повинен відображати нормальні умови експлуатації, включаючи стабільні рівні виробництва, постійне використання обладнання та відсутність аварій, тривалих простоїв або капітальних ремонтів. Зазвичай рекомендується вибирати період тривалістю не менше 12 місяців, щоб врахувати сезонні зміни в технології та організації. Для підприємств зі стабільними, майже незмінними процесами може підійти коротший період від 3 до 6 місяців. Однак для складних операцій із сезонними піками виробництва краще використовувати рік або більше.

Графічне порівняння методів. Для практичного аналізу ефективності методів встановлення базового рівня енергоефективності були використані дані фармацевтичного підприємства за 2019 та 2021 роки у період з серпня по липень. При побудові моделі враховувалися наступні змінні:

- y – споживання електроенергії, кВт·год;
- x_1 – тривалість світлового дня, год;
- x_2 – температура повітря, °C;
- x_3 – обсяг виробництва продукції, тис. упаковок.

Для статистичного методу базовий рівень визначався як середнє значення енергоспоживання за обрані роки, що дозволяє оцінити усереднений рівень споживання без врахування впливу змінних факторів.

Для регресійного методу було побудовано математичну модель залежності енергоспоживання від ключових факторів:

$$y = -918\,516,37 + (-19054,11 \cdot x_1) + 11931,32 \cdot x_2 + 202,36 \cdot x_3$$

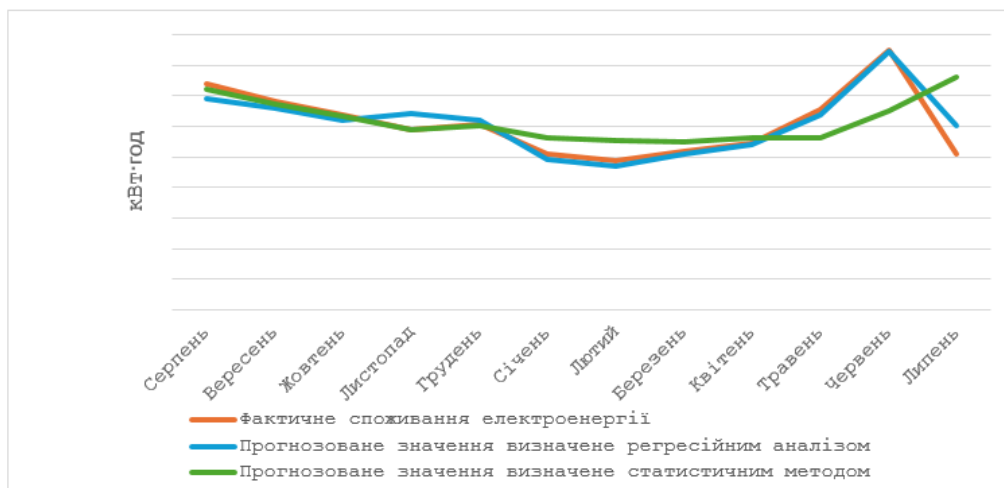


Рисунок 1 – Порівняння фактичного та розрахованих базових рівнів енергоспоживання.

Ця модель дозволяє врахувати вплив зовнішніх і технологічних факторів на енергоспоживання та прогнозувати зміни при варіації умов роботи підприємства. Для наочності ефективності методів побудуємо графік:

Статистичний метод показує усереднені значення енергоспоживання, які не реагують на зміни виробничого обсягу, тоді як регресійний метод відображає залежність споживання від ключових факторів і дозволяє прогнозувати його зміни при зміні умов.

Висновок. Аналіз показав, що з основних способів визначення базового рівня енергоефективності найточнішим є метод регресії. Він враховує вплив таких змінних факторів, як температура, тривалість світлового дня та обсяги виробництва. Наприклад, у фармацевтичній компанії з 2019 по 2021 рік статистичний підхід дає лише середню оцінку енергоспоживання. Натомість метод регресії дає більш точне уявлення про фактичні тенденції та дозволяє краще прогнозувати зміни умов.

Список використаних джерел

1. ДСТУ ISO 50001:2014 (ISO 50001:2011, IDT). Енергозбереження. Системи енергетичного менеджменту. Вимоги з настановами щодо використання. – Київ, 2015.
2. ДСТУ ISO 50004:2016 (ISO 50004:2014, IDT). Системи енергетичного менеджменту. Настанови щодо впровадження, підтримання та поліпшення системи енергетичного менеджменту. – Київ, 2016.
3. Півняк Г., Випасненко С., Хованська А. та ін. Енергетичні системи та їх математичне забезпечення. – Дніпропетровськ, 2013.
4. О. В. Бориченко, В. Ф. Находов. Методи вимірювання та верифікації енергетичної результативності компанії: Практикум. – Київ: НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського», 2020.
5. Міністерство інфраструктури та розвитку громад України. Про затвердження Методики визначення базового рівня енергетичної ефективності : Наказ № 1140 від 14.12.2023. // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/z0192-24>

Бориченко О.В., канд. техн. наук., доцент, завідувач кафедри електропостачання
Навчально-науковий інститут енергозбереження та енергоменеджменту
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна

РОЛЬ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ ЕНЕРГОМОНІТОРИНГУ В ЕНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТІ МУНІЦИПАЛЬНИХ БУДІВЕЛЬ

Вступ. Однією з головних проблем сучасного муніципального енергоменеджменту є відсутність своєчасного доступу до надійних даних про енергоспоживання в міських будівлях. Аналіз показує, що ефективне управління енергією в міських системах можливий лише за умови регулярного збору, обробки та аналізу даних про енергоспоживання [1]. Традиційна система контролю енергоспоживання базується на щомісячних звітах, що не дозволяє швидко реагувати на зміни або надзвичайні ситуації. Одним з ефективних рішень є впровадження автоматизованих систем моніторингу енергоспоживання (АСЕМ). Ці системи збирають, передають, зберігають та аналізують інформацію в єдиному середовищі. Вони не тільки допомагають контролювати споживання, але й скорочують витрати на енергопостачання та обслуговування обладнання на 5–30% завдяки підвищенню ефективності управління ресурсами [2]. Автоматизований моніторинг – це не лише спосіб відстеження енергоспоживання. Це також важлива складова системи енергоменеджменту, спрямованої на підвищення енергоефективності відповідно до міжнародного стандарту ISO 50001.

Мета роботи. Метою цієї роботи є вивчення того, як АСЕМ сприяє підвищенню ефективності управління енергоспоживанням у муніципальних організаціях. А також розглядаються результати їх впровадження на прикладі системи моніторингу освітніх установ.

Теоретичні основи та нормативно-правова база.

Впровадження систем моніторингу енергоспоживання в муніципальному секторі України здійснюється відповідно до Закону України «Про енергоефективність» (№ 1818-IX). Цей закон вимагає від органів влади та муніципальних установ впровадити системи енергоменеджменту для підвищення енергоефективності [3]. Процедура встановлення базових рівнів енергоспоживання, а також збір і аналіз даних регулюються Постановою Кабінету Міністрів України № 1460 від 23 грудня 2021 року. Ця постанова встановлює державну інформаційну систему енергетичного моніторингу [4]. На міжнародному рівні основу складають стандарти ISO 50006 та ISO 50001. Ці стандарти визначають, як будувати системи енергоменеджменту на основі принципу «Плануй, Виконуй, Перевіряй, Дій», де постійний моніторинг та вимірювання є необхідними для поліпшення процесів [5]. У цих умовах автоматизована система енергоменеджменту (АСЕМ) служить інструментом для виконання законодавчих та міжнародних вимог. Вона забезпечує збір даних з лічильників тепла, електроенергії, води та газу. Вона також підтримує зберігання та аналіз даних за допомогою графіків, звітів та ключових показників ефективності (EnPI).

Основними перевагами системи є щогодинне оновлення даних та віддалений доступ через веб-інтерфейс. Вона дозволяє в режимі реального часу виявляти надмірне споживання енергії, автоматично формувати звіти для місцевих органів влади та інтегруватися з базами даних енергетичних сертифікатів. Таким чином, АСЕМ виступає технічною та аналітичною основою муніципального енергоменеджменту. Вона дозволяє муніципальним установам ефективно дотримуватися національного законодавства та міжнародних стандартів у своїй практичній роботі.

Практичні аспекти застосування.

Автоматизовані системи моніторингу енергії в муніципальних будівлях виступають інструментами, що надають зворотний зв'язок про технічний стан системи енергоспоживання та управлінські рішення, прийняті енергетичним менеджером громади.

1. Збір та перевірка даних

АСЕМ автоматично зчитує дані з лічильників тепла, електроенергії, води та газу. Лічильники на об'єкті передають ці дані на сервер моніторингу. Зібрані показання допомагають створити повний енергетичний баланс будівлі.

2. Формування базових рівнів та показників енергоефективності

АСЕМ збирає дані, необхідні для встановлення базових рівнів енергоспоживання (EnB) та визначення показників ефективності (EnPI). Це допомагає виявити відхилення, які не можна пояснити зовнішніми факторами, такими як температура або зміни в графіку роботи.

3. Швидке реагування та управління

Завдяки аналітичним модулям система швидко виявляє надзвичайні ситуації або неефективну роботу, включаючи витоки тепла, надмірне споживання електроенергії та несправності обладнання. Повідомлення надсилаються енергетичному менеджеру, що дозволяє вчасно реагувати, перш ніж будуть витрачені значні ресурси.

На рисунку 1 представлена структурна схема АСЕМ на прикладі будівлі закладу освіти.

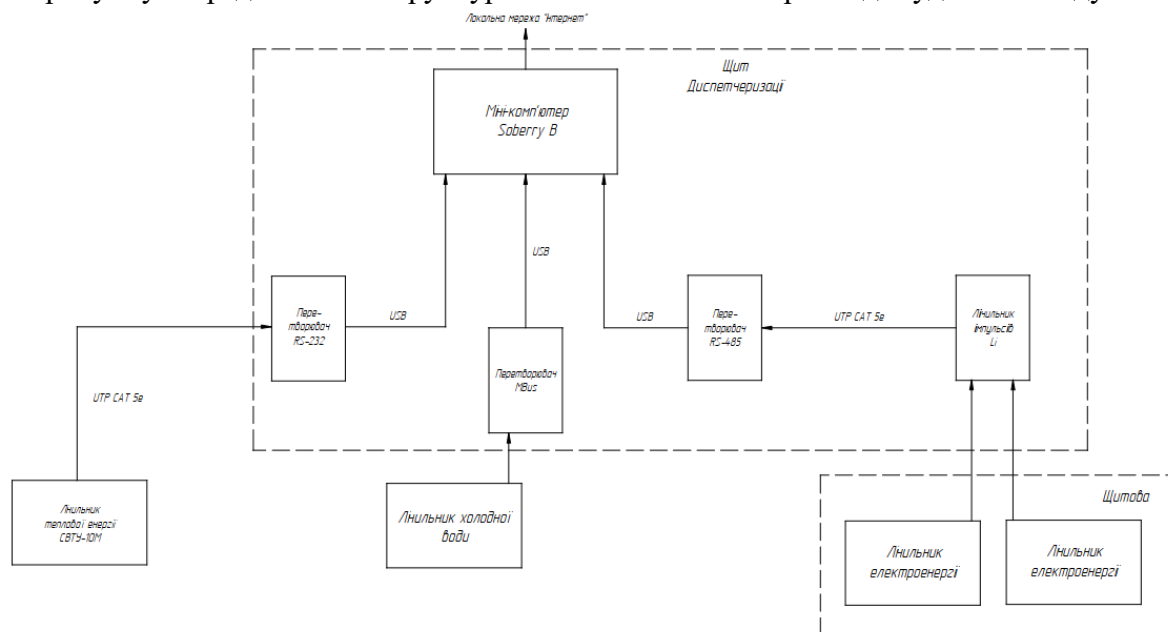


Рисунок 1 – Структурна схема АСЕМ для закладу освіти

4. Підтримка прийняття управлінських рішень

АСЕМ генерує щоденні профілі енергоспоживання, які показують, як фактично працює будівля. Аналіз цих профілів допомагає визначити пікові періоди споживання, неефективне споживання енергії в неробочий час та ефективність регулювання, що залежить від погодних умов.

На рисунку 2 представлений щоденний профіль споживання електроенергії закладом освіти.

Порівняння профілів споживання за різні дати дає змогу оцінити динаміку навантаження будівлі, виявити сезонні коливання та скоригувати режими роботи систем для забезпечення стабільної енергоефективності. Як видно з графіка, у квітні споживання електроенергії є вищим у денні години (10:00–17:00) порівняно з липнем, що може бути пов'язано з активнішою роботою освітлення та обладнання в цей період. Використовуючи цю інформацію, енергетичний менеджер може приймати обґрунтовані рішення щодо регулювання налаштувань опалення, вентиляції та кондиціонування повітря, зміни графіків опалення та освітлення, а також оптимізації використання обладнання.

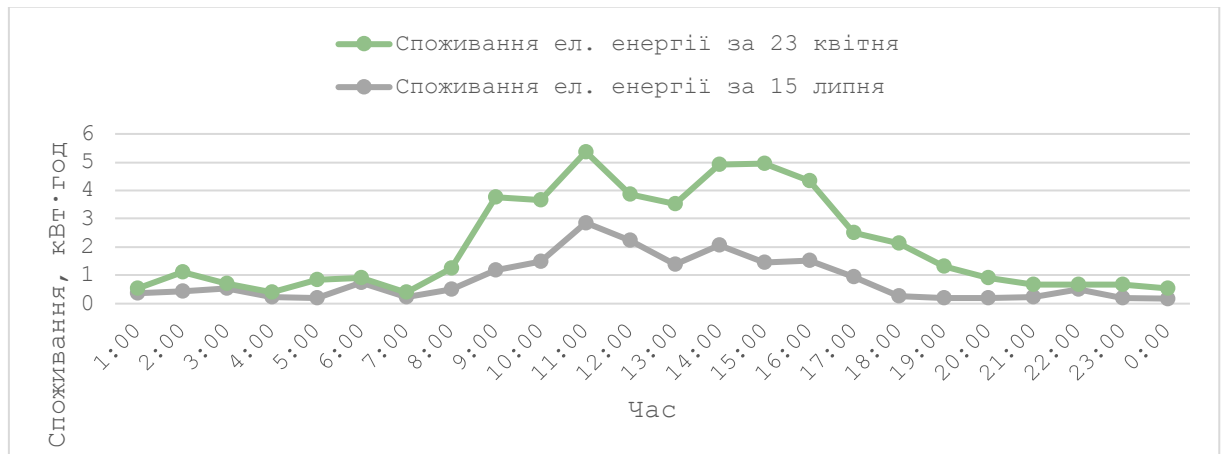


Рисунок 2 – Щоденний профіль споживання електроенергії

5. Поведінкові та організаційні ефект

Окрім технічної функціональності, АСЕМ відіграє важливу роль у наданні інформації та сприянні дисципліні. Відкритий доступ до звітів підвищує обізнаність персоналу та заохочує дотримання енергозберігаючих практик.

6. Обмеження та складність аналізу

Зміни в споживанні енергії після впровадження системи не завжди пов'язані виключно з АСЕМ. На результати можуть впливати різні фактори, включаючи погодні умови, зміни в графіках роботи будівлі або моделі поведінки. Тому її ефективність слід оцінювати комплексно, враховуючи кліматичні та експлуатаційні фактори.

Висновки:

1. Автоматизовані системи моніторингу енергії відіграють важливу роль в управлінні енергетикою муніципалітетів. Вони забезпечують надійні, своєчасні та організовані записи про використання енергії.

2. Основною метою АСЕМ є створення єдиної бази даних, яка використовується для аналізу, планування та контролю енергетичних процесів у громадах.

3. Ці системи дозволяють приймати кращі управлінські рішення, знижувати енергетичні витрати та чіткіше розподіляти бюджетні кошти.

4. Розвиток муніципальних систем енергоменеджменту в Україні потребує широкого впровадження АСЕМ, навчання персоналу та інтеграції з національними енергетичними базами даних.

Список використаних джерел:

6. Огляд автоматизованих інформаційних систем для енергомоніторингу 2020. Львів: Асоціація «Енергоефективні міста України», 2020. – 35 с.

7. Автоматизована Система Енергетичного Моніторингу | АСЕМ. Автоматизована Система Енергетичного Моніторингу | АСЕМ. URL: <https://asem.escoua.com/#about>.

8. Про енергетичну ефективність. Офіційний вебпортал парламенту України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1818-20#Text>.

9. Про впровадження систем енергетичного менеджменту. Офіційний вебпортал парламенту України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1460-2021-п#Text>.

10. ДСТУ ISO 50006:2016 Системи енергетичного менеджменту. Вимірювання рівня досягнутої/досяжної енергоефективності з використанням базових рівнів енергоспоживання та показників енергоефективності. Загальні положення та настанова (ISO 50006:2014, IDT).

ІНТЕГРАЦІЯ СИСТЕМ ЕНЕРГОМОНІТОРИНГУ В МУНІЦИПАЛЬНУ ІНФРАСТРУКТУРУ ЖИТЛОВИХ РАЙОНІВ

Сучасні українські міста перебувають у стані глибоких трансформацій, зумовлених одночасно війною, економічними викликами та необхідністю енергетичної модернізації. Руїнування критичної інфраструктури та дефіцит ресурсів продемонстрували слабкі місця централізованої енергосистеми, яка тривалий час не враховувала реальні потреби споживачів на місцевому рівні [1]. За цих умов розвиток децентралізованих цифрових систем управління енергоспоживанням стає не просто технологічним трендом, а питанням національної безпеки.

Одним із ключових напрямів таких змін є впровадження енергомоніторингу – системного процесу збору, аналізу та інтерпретації даних про споживання енергоресурсів у реальному часі [2]. Якщо раніше цей інструмент використовувався переважно у промислових підприємствах, то нині він набуває значення для муніципального рівня — житлових районів, комунальних установ та об'єктів соціальної інфраструктури.

Інтеграція систем енергомоніторингу в муніципальну інфраструктуру передбачає створення єдиної цифрової екосистеми, у межах якої кожен житловий будинок або група будинків виступає джерелом даних для міської аналітичної платформи [3]. Це дозволяє не лише фіксувати обсяги споживання електроенергії, тепла чи води, а й здійснювати порівняльний аналіз, прогнозування та розробку управлінських рішень на основі реальних показників. Такі системи ґрунтуються на технологіях Інтернету речей (IoT), бездротових сенсорних мережах і хмарних обчисленнях, що забезпечує оперативність і точність моніторингу [4].

Переваги муніципального енергомоніторингу є багатовимірними:

- Економічна ефективність: контроль за споживанням у режимі 24/7 дає змогу знизити витрати на енергію до 15–25%, оптимізуючи роботу теплових пунктів, насосних станцій і систем освітлення.
- Енергетична незалежність: громада отримує інструменти для самостійного управління споживанням і планування переходу на відновлювані джерела енергії.
- Стійкість до криз: під час перебоїв у постачанні енергоресурсів система допомагає визначати пріоритети забезпечення критичних об'єктів і запобігати аваріям.
- Прозорість і довіра: мешканці отримують доступ до відкритих даних, що підвищує рівень відповідальності та мотивації до енергозбереження.

Важливою складовою інтеграції таких систем є поєднання енергомоніторингу з муніципальними платформами управління містом. Наприклад, створення єдиних центрів моніторингу на базі міських рад дозволяє координувати дії комунальних підприємств, шкіл, лікарень та житлово-комунальних сервісів. Це створює передумови для комплексного енергоаудиту та розробки програм підвищення ефективності, заснованих на достовірних даних [5].

Окрему роль відіграють інтелектуальні аналітичні системи, що використовують алгоритми штучного інтелекту для виявлення аномалій у споживанні енергоресурсів. Наприклад, автоматичне виявлення витоків тепла або води, нераціонального навантаження в години піку чи неправильних режимів роботи обладнання допомагає своєчасно реагувати на проблеми та мінімізувати втрати [6].

Для України особливо актуальним є створення інтегрованих рішень на рівні житлових районів, де об'єднання кількох будинків в єдину енергетичну мережу дозволяє

досягти синергії — ефективніше балансувати споживання, оптимізувати пікові навантаження та координувати роботу локальних генераційних джерел, зокрема сонячних панелей і теплових насосів [7].

Не менш важливо забезпечити освітню складову — підготовку енергоменеджерів, здатних працювати з цифровими технологіями, аналізом великих масивів даних і програмним забезпеченням для управління енергетичними процесами. Впровадження таких кадрів у громадах дозволить перейти від реактивного до проактивного управління енергетичними ресурсами [4].

Європейська практика (зокрема, досвід Німеччини, Фінляндії та Нідерландів) демонструє, що такі системи стають основою муніципальних стратегій «розумного міста» (Smart City) [2]. Україна має реальні передумови для масштабування подібних рішень: розвиток цифрових платформ державних послуг, створення енергетичних хабів при громадах, а також зростання інтересу інвесторів до проєктів «зеленої» модернізації [3].

Висновки. Енергомоніторинг у муніципальній інфраструктурі — це не лише технічний інструмент, а стратегічний ресурс розвитку громади [1]. Його впровадження дозволяє підвищити енергоефективність, зменшити навантаження на бюджети, зміцнити енергетичну незалежність і наблизити українські міста до стандартів сталого європейського розвитку. У післявоєнний період саме такі системи можуть стати основою для відбудови сучасних, цифрово керованих і стійких до криз міських екосистем. Важливо, щоб муніципалітети розглядали енергомоніторинг не як витрату, а як інвестицію у майбутнє громади. Це дозволить створити нову енергетичну культуру, засновану на відповідальному використанні ресурсів, прозорості даних і технологічній інтеграції.

Список використаної літератури:

1. ISO 50006:2021. Energy management systems — Measurement of energy performance using energy baselines and energy performance indicators. International Organization for Standardization. URL: <https://www.iso.org/standard/81290.html>
2. Smart City Energy Monitoring Frameworks. European Commission, 2023. URL: <https://commission.europa.eu/>
3. Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України. Програма муніципального енергомоніторингу. URL: <https://saee.gov.ua/uk/activity/energomonitoring>
4. Мінрегіон України. Концепція цифрової трансформації міст. 2024. URL: <https://www.minregion.gov.ua/napryamki/digitalizatsiya/>
5. Громадська спілка «Енергетична Асоціація України». Практики муніципального енергоменеджменту. 2023. URL: <https://energyua.org/>
6. Асоціація енергоефективних міст України. Аналітичний звіт «Інтелектуальні рішення для енергетичних громад». 2024. URL: <https://energy-cities.org.ua/>
7. Проєкт USAID «Енергетична безпека». Аналітичний звіт «Розвиток систем локального енергомоніторингу в громадах України». 2025. URL: <https://energysecurityua.org/>

Бориченко О.В., к.т.н., доц., Телевний Д.О., магістр,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ РІШЕННЯ ДЛЯ ТЕХНОЛОГІЙ ОБСМАЖЕННЯ КАВИ НА ПІДПРИЄМСТВІ ХАРЧОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

Вступ. Процеси обсмаження кави є одними з найбільш енергоємних у харчовій промисловості, адже вимагають тривалого нагріву повітря до температур 180–200 °С із використанням природного газу. Лише 35–40 % енергії спалювання перетворюється на корисну теплоту для обсмаження зерна, тоді як решта втрачається через димові канали, вентиляцію та охолоджувачі продукції. [1] В умовах зростання цін на енергоресурси та декарбонізаційного курсу промисловості питання рекуперації відпрацьованої теплоти стає ключовим для підвищення конкурентоспроможності виробництв. [2]

Метою дослідження є оцінка потенціалу утилізації вторинних енергетичних ресурсів на підприємстві ТОВ «Компанія «ФУД ПАК» (ТМ Gemini), що спеціалізується на обсмаженні та фасуванні кави, і розроблення техніко-економічно обґрунтованої системи рекуперації теплоти для скорочення споживання природного газу.

Матеріали та методи. Аналіз проведено на основі енергетичного обстеження ростерів IMF RM-240 та Genio 30, які працюють на природному газі, а також системи охолодження обсмаженого зерна, вентиляції, котельні та фасувальних ліній. На основі показників паливоспоживання, тривалості циклів обсмаження (≈ 2000 год/рік) та температури димових газів (160–180 °С) побудовано енергетичний баланс підприємства. [3]

Досліджено три варіанти утилізації: 1) відбір теплоти з поверхонь ростера (низька ефективність, до 5 %); 2) внутрішня рециркуляція гарячого повітря (реалізована виробником IMF); 3) комбінована зовнішня система рекуперації, що включає теплообмінник «газ–вода» та пластинчастий повітряний рекуператор. Останній варіант обрано як найбільш збалансований за технічною сумісністю, безпечністю та економічним ефектом. [4]

Результати дослідження. Вихідна теплова потужність ростера IMF RM-240 становить ≈ 980 кВт, з яких близько 60 % (590 кВт) використовується в робочому режимі. При цьому втрати з димовими газами після термоокиснювача оцінюються в ≈ 18 % (105 кВт), а з повітрям охолоджувача зерна – у ≈ 6 % (35 кВт). Встановлення трубчастого теплообмінника exodraft CHR-P 80 у димовому каналі та пластинчастого рекуператора на повітряній лінії охолодження дозволяє утилізувати до 90 кВт корисної теплоти (≈ 55 % від втрат). [5] За річної тривалості роботи 2000 год отримуємо ≈ 180 МВт·год/рік утилізованої енергії, або $\approx 18\,000$ м³ природного газу. При середній вартості газу 24 грн/м³ економічний ефект становить $\approx 432\,000$ грн/рік, а скорочення викидів CO₂ – приблизно 35 т/рік.

Ключові елементи системи: водяний теплообмінник (твих. ≈ 75 °С), що передає енергію у буферну ємність 1 м³; циркуляційний насос (Wilо Stratos MAXO 30/0.5-12); повітряний рекуператор (Heatex Model H, $\epsilon \approx 0.6$, $Q \approx 15$ кВт); автоматика керування температурою припливного повітря [6] [7]. Сумарна вартість обладнання й монтажу оцінюється у ≈ 700 тис. грн, що забезпечує термін окупності $\approx 1,6$ року.

Практичне значення результатів дослідження. Для підприємств кавової та харчової промисловості подібна технологія має подвійний ефект. По-перше, відновлюється до 10 % споживаної енергії без змін у технології обсмаження. [8] По-друге, стабілізується мікроклімат виробничих приміщень, що покращує умови праці персоналу та якість продукції. На відміну від класичних теплообмінників котельних, системи рекуперації для ростерів працюють із переривчастими тепловими потоками. Тому застосування буферної ємності є критично важливим для згладжування теплових циклів і забезпечення сталого відбору енергії.

Висновки. Розроблена комбінована система рекуперації теплоти димових газів і повітря охолоджувача зерна забезпечує: зниження споживання природного газу

підприємством на 5–6 %; економію до 0,43 млн грн/рік; скорочення викидів CO₂ на $\approx$ 35 т/рік; термін окупності $\leq$ 2 роки, що відповідає міжнародним критеріям ефективності енергоощадних інвестицій; можливість масштабування рішення для інших виробництв із термічними процесами. Таким чином, впровадження систем рекуперації тепла на базі ростерів кави є технічно здійсненним, економічно вигідним і екологічно обґрунтованим рішенням. Розроблене рішення може бути інтегроване в енергетичну політику підприємства як складова системи енергетичного менеджменту відповідно до принципів ISO 50001.

Список використаної літератури:

1. Держенергоефективності України. *Методичні рекомендації з проведення енергетичних аудитів промислових підприємств*. — Київ, 2023. — 48 с.
2. ДСТУ ISO 50001:2020. *Системи енергетичного менеджменту. Вимоги та настанови щодо застосування*. — Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2020.
3. EN 16247-1:2022. *Energy Audits — Part 1: General Requirements*. — European Committee for Standardization, Brussels, 2022.
4. Exodraft A/S. *Heat Recovery Solutions for Industrial Processes*. — Brochure, 2023. — URL: <https://www.exodraft.com>.
5. Wilo SE. *Stratos MAXO Series: Technical Data Sheet*. — Dortmund, 2023. — URL: <https://wilo.com>.
6. Grundfos. *MAGNA3 Series Circulator Pumps – Product Data*. — Bjerringbro, 2023. — URL: <https://product-selection.grundfos.com>.
7. Heatex AB. *Crossflow Plate Heat Exchangers – Technical Manual*. — Stockholm, 2024. — URL: <https://www.heatex.com>.
8. Deshko V., Borychenko O., Popov V. *Heat Recovery and Energy Efficiency in the Food Industry: Practical Applications*. // *Energy: Economics, Technology, Ecology*. — 2024. — №2. — С. 41–49.

ДОЦІЛЬНІСТЬ СТВОРЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО КООПЕРАТИВУ У ВІЙСЬКОВИЙ ЧАС В УКРАЇНІ

Повномасштабна війна в Україні суттєво змінила контекст функціонування енергетичного сектору, поставивши перед державою та суспільством нові виклики. Масовані ракетні та дроніві атаки на об'єкти енергетичної інфраструктури призвели до масштабних руйнувань електростанцій, підстанцій, ліній електропередач і систем теплопостачання. Це, у свою чергу, спричинило дефіцит потужності джерел централізованої генерації, порушення логістичних ланцюгів постачання енергоресурсів та нестабільність централізованого енергопостачання в окремих регіонах.

Нині існує нагальна потреба у переосмисленні принципів енергетичної політики та переході до більш гнучкої, стійкої і децентралізованої системи управління енергетичними ресурсами.

Одним із найефективніших механізмів досягнення цієї мети може стати енергетичний кооператив - форма спільного володіння, користування та управління об'єктами генерації, у тому числі з використанням відновлюваних джерел енергії. Енергетичний кооператив забезпечує локалізацію енергетичних процесів, дозволяючи громаді самостійно планувати, виробляти, споживати й розподіляти енергію. Це не лише зменшує залежність від централізованих постачальників, а й підвищує рівень енергетичної безпеки та стійкості місцевих територіальних громад, особливо в умовах воєнного стану.

Енергетичний кооператив - це юридична форма об'єднання громадян, підприємств чи органів місцевого самоврядування, метою якого є спільне виробництво, споживання або збут енергії, найчастіше з відновлюваних джерел [1].

Ключові переваги:

- децентралізація енергетики - зменшує залежність від великих генеруючих компаній та централізованих мереж;
- підвищення енергетичної безпеки - у разі пошкодження енергетичних об'єктів, громада може забезпечувати себе електроенергією автономно;
- економічна вигода - прибуток залишається в громаді, створюються робочі місця, підвищується енергоефективність споживання;
- екологічна складова - використання сонячної, вітрової або біоенергетики сприяє скороченню викидів CO₂.

Військові дії в Україні призвели до руйнування понад 50% енергетичної інфраструктури в окремих регіонах [2]. У таких умовах централізована система енергопостачання виявилася вразливою.

Створення енергетичних кооперативів є доцільним із таких причин:

1. забезпечення енергетичної стійкості громад. Енергокооперативи дозволяють громадам самостійно генерувати енергію для критичної інфраструктури - лікарень, водоканалів, шкіл, пунктів незламності тощо;
2. підвищення рівня локальної енергетичної незалежності. За рахунок встановлення малих сонячних, біогазових або міні-вітрових установок, громада може працювати автономно навіть у разі відключення від загальної мережі;
3. соціально-економічна мобілізація населення. Енергокооперативи стимулюють взаємодію місцевих жителів, бізнесу й влади, формуючи горизонтальні зв'язки та довіру - важливий фактор відновлення після війни;

4. механізм відновлення інфраструктури. Після зруйнування енергетичних об'єктів громади можуть швидше відновити енергопостачання через спільне фінансування проєктів на місцевому рівні;
5. міжнародна підтримка. Європейський Союз активно підтримує розвиток енергетичних кооперативів у межах «Зеленого курсу» та програм відновлення України [3]. Це відкриває доступ до грантів і технологій.

Законодавство України (Закони «Про кооперацію» [4], «Про ринок електричної енергії» [5], «Про альтернативні джерела енергії» [6]) створює передумови для діяльності кооперативів. Однак практична реалізація потребує:

- спрощення процедур приєднання до мережі;
- удосконалення механізмів тарифоутворення та компенсацій;
- можливості участі кооперативів у системах енергетичних громад за європейським зразком.

Запровадження національної програми підтримки енергокооперативів могло б стати важливим інструментом енергетичної політики України у післявоєнний період.

Проєкти енергетичних кооперативів (наприклад, у Хмельницькій та Київській областях), демонструють реальні результати - підвищення автономності громад, виробництво та продаж електроенергії, паливних брикетів тощо [7].

У військовий час ці рішення стають критично важливими для забезпечення енергетичної стійкості тилових регіонів і відновлення зруйнованих територій.

З огляду на ці фактори - не існує універсальної форми прорахунку доцільності створення енергокооперативу, проте дуже важливо проаналізувати та врахувати оцінку потенційних витрат та потенційних доходів, розрахунок точки беззбитковості та періоду окупності, чисту приведену вартість та внутрішню норму дохідності, провести аналіз ризиків і вже тоді приймати рішення.

Висновки. Створення енергетичних кооперативів у військовий час є доцільним і стратегічно необхідним кроком для України. Вони сприяють підвищенню енергетичної безпеки, зміцненню громад, формуванню нової енергетичної культури та інтеграції України до європейського енергетичного простору. Крім того, розвиток таких кооперативів стимулює активну участь громадян у прийнятті енергетичних рішень, підвищуючи рівень енергетичної свідомості населення та соціальної відповідальності. В умовах післявоєнного відновлення саме енергокооперативи можуть стати одним із ключових інструментів сталого розвитку та децентралізованої енергетики.

Список використаної літератури

1. Термін «Енергетичний кооператив». *Офіційний вебпортал парламенту України*. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/term/45602/sp:head> (дата звернення: 01.11.2025).
2. Пошкоджені 50 % енергетичної інфраструктури України. *Урядовий Кур'єр*. URL: <https://ukurier.gov.ua/uk/news/poshkodzheni-50-energetichnoyi-infrastrukturi-ukra/> (дата звернення: 01.11.2025).
3. Європейський Зелений Курс. *Екодія*. URL: <https://ecoaction.org.ua/ievropejskyj-zelenyj-kurs.html> (дата звернення: 28.10.2025).
4. Закон України "Про кооперацію". *Офіційний вебпортал парламенту України*. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1087-15> (дата звернення: 02.11.2025).
5. Закон України "Про ринок електричної енергії". *Офіційний вебпортал парламенту України*. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19#Text> (дата звернення: 02.11.2025).
6. Закон України "Про альтернативні джерела енергії". *Офіційний вебпортал парламенту України*. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/555-15#Text> (дата звернення: 02.11.2025).
7. Енергетичні кооперативи в Україні. *Українські енергетичні кооперативи*. URL: <https://uaenergycoop.com/> (дата звернення: 02.11.2025).

ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОЇ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ВОЛОКНИСТОГО КОМПОЗИТУ ЗА ТРИФАЗНОЮ МОДЕЛЛЮ

Сучасний етап розвитку енергетики в усьому світі характеризується підвищеними вимогами до ефективності, надійності та екологічної безпеки енергетичних систем. Зростання енергоспоживання, дефіцит природних ресурсів і необхідність зниження викидів парникових газів зумовлюють потребу у впровадженні новітніх матеріалів і технологій, спрямованих на підвищення енергоефективності та енергозбереження.

Важливу роль у цьому процесі відіграють сучасні композитні матеріали, зокрема композити регулярної структури, які поєднують у собі легкість, високу міцність, а також здатність до керованої зміни властивостей. Розроблення та моделювання композитів регулярної структури дає змогу оптимізувати матеріали за заданими фізико-механічними параметрами, що є актуальним для сучасної енергетики – як традиційної, так і відновлюваної.

Актуальність досліджень у цій сфері зумовлена потребою підвищення ефективності використання енергоресурсів, зниження експлуатаційних витрат і продовження терміну служби енергетичних систем та споруд, що є ключовим завданням у процесі повоєнного відновлення України.

Метою даної роботи є побудова трифазної моделі (ТФМ) для задачі теплопровідності волокнистих композитів регулярної структури з криволінійними ромбічними включеннями, її асимптотичний аналіз та оцінка області застосування.

Розглядається двофазний мікронеоднорідний матеріал, що складається з безперервної матриці та періодично розташованих у ній циліндричних включень криволінійного ромбічного профілю. Структура двоякоперіодична з періодом, однаковим в обох напрямках; включення розташовані по квадратній сітці. Для композитного масиву розглядається задача теплопровідності; у загальному випадку фази композиту мають різні теплопровідності: λ^+ і λ^- відповідно в матриці та вставках.

Застосування методу двохмасштабних розкладень [1] і теорії осереднення [2] дозволяє звести вихідну задачу для багатозв'язної області до задачі в області характерної структурної одиниці композиту – комірки (рис. 1).

У «швидких» змінних ξ, η задача на комірку записується у вигляді:

$$\frac{\partial^2 u_1^+}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 u_1^+}{\partial \eta^2} = 0 \text{ в } \Omega_i^+; \quad \frac{\partial^2 u_1^-}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 u_1^-}{\partial \eta^2} = 0 \text{ в } \Omega_i^-; \quad (1)$$

$$u_1^+ = u_1^-; \quad \frac{\partial u_1^+}{\partial \bar{n}} - \lambda \frac{\partial u_1^-}{\partial \bar{n}} = (\lambda - 1) \frac{\partial u_0}{\partial \bar{n}} \text{ на } \partial \Omega_i; \quad (2)$$

$$u_1^+ \Big|_{\xi=1} = u_1^+ \Big|_{\xi=-1}; \quad u_1^+ \Big|_{\eta=1} = u_1^+ \Big|_{\eta=-1}; \quad \frac{\partial u_1^+}{\partial \xi} \Big|_{\xi=1} = \frac{\partial u_1^+}{\partial \xi} \Big|_{\xi=-1}; \quad \frac{\partial u_1^+}{\partial \eta} \Big|_{\eta=1} = \frac{\partial u_1^+}{\partial \eta} \Big|_{\eta=-1}, \quad (3)$$

де $\lambda = \lambda^- / \lambda^+$; u_1^+, u_1^- – функції розподілу температури першого наближення відповідно в матриці Ω_i^+ та включеннях Ω_i^- ; u_0 – функція розподілу температури нульового наближення у гладкій області комірки; $\bar{n}, n$ – зовнішня нормаль до контуру включення, записана відповідно у «швидких» та «повільних» змінних.

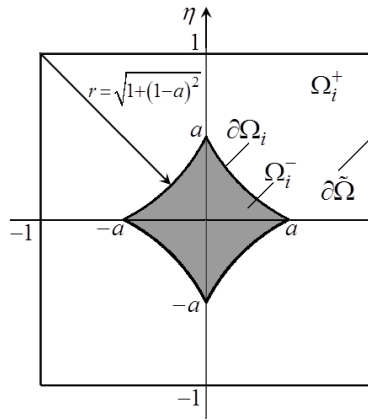


Рисунок 1 – Характерна структурна комірка композиту

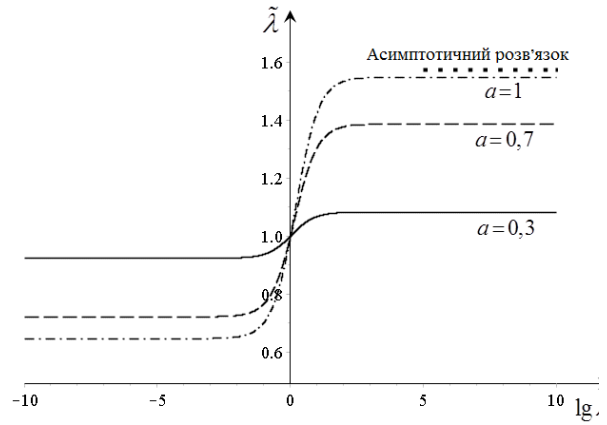


Рисунок 2 – Ефективний коефіцієнт теплопровідності для різних розмірів включень

Для розв'язку локальної задачі (1)-(3) використовується ТФМ композитної структури [3]. Суть моделі полягає в тому, що вся періодична структура, за винятком однієї комірки, замінюється однорідним осередненим середовищем $\tilde{\Omega}$ з невідомим (шуканим) ефективним коефіцієнтом теплопровідності $\tilde{\lambda}$. Геометрична ідеалізація в рамках моделі полягає у тому, що в нульовому наближенні криволінійний ромбічний контур включення $\partial\Omega_i$ і квадратний контур матриці (комірки) $\partial\tilde{\Omega}$ замінюються на кола. При цьому радіуси відповідних кіл r_0^- , r_0^+ вибираються таким чином, щоб зберігалася рівність площ вихідної та перетвореної областей включення та комірки (матриці):

$$r_0^- = \sqrt{\frac{a}{\pi} - \frac{1+(1-a)^2}{2\pi} \arcsin \frac{1-(1-a)^2}{1+(1-a)^2}}; \quad r_0^+ = \frac{2}{\sqrt{\pi}}.$$

Після розв'язку задачі на комірці (1)-(3) побудова осереднених співвідношень здійснюється інтегруванням по всій трифазній області – матриці, включенню і осередненому середовищу. Використовуючи осереднене співвідношення, приходимо для визначення шуканого параметра $\tilde{\lambda}$ до лінійного алгебраїчного рівняння, розв'язок якого дає аналітичний вираз коефіцієнта ефективної теплопровідності:

$$\tilde{\lambda} = \frac{2(1-a) + \left(1+(1-a)^2\right) \arcsin \frac{1-(1-a)^2}{1+(1-a)^2} + \lambda \left(2(1-a) - \left(1+(1-a)^2\right) \arcsin \frac{1-(1-a)^2}{1+(1-a)^2} \right)}{2(1-a) - \left(1+(1-a)^2\right) \arcsin \frac{1-(1-a)^2}{1+(1-a)^2} + \lambda \left(2(1-a) + \left(1+(1-a)^2\right) \arcsin \frac{1-(1-a)^2}{1+(1-a)^2} \right)}.$$

Аналіз виразу ефективної теплопровідності показує, що відхилення значень, знайдених за ТФМ, від асимптотичного розв'язку [3] в граничному випадку ідеально провідних включень $\lambda \rightarrow \infty$ гранично великого розміру $a=1$ складає 1,55% (рис. 2). Отже, розв'язок за ТФМ у випадку криволінійних ромбічних включень дає достовірні результати практично в усьому діапазоні зміни фізичного λ і геометричного a параметрів композиту.

Список використаної літератури

1. Nayfeh A. H. Perturbation methods. – New York: John Wiley & Sons, 2000. – 425 p.
2. Lions J.-L. On same homogenisation problem // ZAMM – Journal of Applied Mathematics and Mechanics. – 1982. – Vol. 62. – Is. 5. – P. 251–262.
3. Andrianov I. V., Awrejcewicz J., Starushenko G. A. Approximate models of mechanics of composites: An asymptotic approach : monograph. – London, New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2023. – 367 p.

КОЕФІЦІЄНТ ДЕГРАДАЦІЇ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ФАСАДІВ БУДІВЕЛЬ

Вступ. Фундаментальна проблема сучасної технічної теплофізики полягає у забезпеченні стабільності процесів теплопередачі в неоднорідних середовищах з часово змінними властивостями. У класичних моделях теплопровідності припускається сталість коефіцієнта теплопровідності λ , однак реальні матеріали демонструють нелінійну часову зміну теплофізичних характеристик, що пов'язано з дифузією газів, структурним релаксаційним старінням та вологісними циклами.

Проблема стабільності λ є наслідком порушення термодинамічної рівноваги в закритих осередках теплоізоляційних структур. Виникають квазістаціонарні поля температури та парціальних тисків, які зумовлюють необоротну зміну складу газонаповнення та мікроструктури. Це призводить до деградації ефективної λ й, відповідно, зниження теплового опору R огорожувальної конструкції.

Актуальність дослідження зумовлена різким зростанням вартості енергоресурсів в Україні та обмеженнями у їх постачанні, що зафіксовано в офіційних статистичних матеріалах Державної служби статистики України. Як свідчать дані тематичних наборів «Енергетичний баланс», «Ціни на природний газ та електроенергію» та «Використання та запаси палива» [1], протягом останніх років вартість енергоресурсів демонструє стійку тенденцію до зростання, а структура енергоспоживання характеризується підвищенням навантаження на кінцевих споживачів. Це створює критичні умови для будівельного сектору, де частка тепловтрат через огорожувальні конструкції є значною.

У таких умовах проблема довгострокової стабільності теплоізоляційних матеріалів, зокрема деградації їх теплопровідності під час експлуатації, набуває визначального значення.

Метою роботи є дослідження динаміки деградації теплопровідності теплоізоляційних матеріалів фасадів будівель на основі коефіцієнта деградації D_t [2], що описує зміну λ у часі та його кореляція із фактором старіння F_a [3] та λ_{aged} [4].

Результати: коефіцієнт деградації D_t може інтерпретуватися як: експериментальний аналог фактора старіння F_a [3]; більш фізично обґрунтований показник LTTR; інструмент для визначення реального зниження енергоефективності огорожень.

Висновки. Запропонований коефіцієнт деградації D_t дає змогу враховувати старіння теплоізоляційних матеріалів у теплотехнічних розрахунках. Він корелює з міжнародними нормативами й може стати основою для національної стандартизації.

Впровадження коефіцієнта D_t у методики визначення теплового опору дозволяє точніше оцінити клас енергоефективності будівель. Аналіз показав, що зменшення теплового опору на 3–5 % може знизити клас енергоефективності на одну позицію (наприклад, з А до В).

На відміну від нормативних поправок, які часто є усередненими для груп матеріалів, коефіцієнт D_t

- ґрунтується на реальних польових вимірах;
- дає можливість класифікувати матеріали за фактичною стабільністю теплопровідності;
- дозволяє будувати прогностичні моделі деградації та визначати часову динаміку зміни λ ;
- забезпечує точнішу оцінку енергоефективності, особливо для реконструкції та енергоаудиту існуючих будівель.

Таким чином, введення коефіцієнта деградації теплопровідності D_t є науково обґрунтованим розширенням традиційних методів нормування теплотехнічних характеристик та створює основу для переходу від номінальних значень до реальних експлуатаційних показників теплоізоляційних матеріалів.

Подальші дослідження будуть спрямовані на моделювання D_t з урахуванням температурних та вологісних циклів, а також на вивчення деградаційної стійкості вакуумних ізоляційних панелей.

Список використаних джерел:

1. Державна служба статистики України. Тематичні набори даних з енергетики: «Енергетичний баланс», «Ціни на природний газ та електроенергію», «Використання та запаси палива». <https://stat.gov.ua/uk/topics/enerhetyka>
2. Басок Б.І., Гончарук С.М., Данішевський А.С., Гоман Є.І. Динаміка теплофізичних характеристик термоізоляційних матеріалів фасадів будівлі. Енерготехнології та ресурсо збереження. 2025. №3. С. 119-128. (doi: 10.33070/etars.3.2025.09)
3. EN ISO 10456:2007. Building materials and products — Hygrothermal properties — Tabulated design values and procedures for determining declared and design thermal values.
4. EN 13165:2013 + A2:2016. Thermal insulation products for buildings – Factory-made rigid polyurethane foam (PUR) products – Specification.

АНАЛІЗ ЕЛЕКТРИЧНИХ СХЕМ ПІДКЛЮЧЕННЯ ДЛЯ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

Системи збору енергії з навколишнього середовища за допомогою п'єзоелектричних перетворювачів набувають все більшої популярності завдяки можливості забезпечити автономне живлення для різноманітних технічних пристроїв. Однак ефективність таких систем безпосередньо залежить від правильного вибору та оптимізації електричних схем підключення п'єзоелектричних елементів [1]. П'єзоелектричні перетворювачі генерують змінний струм під впливом механічних навантажень, що потребує використання спеціальних схем для перетворення змінного струму в постійний, а також для зниження пульсацій напруги та забезпечення стабільності вихідної енергії. Без використання випрямлячів, фільтрів і адаптації навантаження спостерігаються значні втрати енергії та зменшення терміну служби накопичувачів, саме тому важливим є розробка інтерфейсних схем з високою ефективністю й мінімальними втратами [2].

Проведено аналіз схем підключення, який показав, що для ефективного збору енергії з п'єзоелектричних перетворювачів необхідно використовувати адаптивні електричні схеми. Повнохвильовий мостовий випрямляч, дозволяє ефективно перетворювати змінний струм на постійний і зменшувати пульсації, що важливо для стабільної роботи акумуляторів та електричних навантажень [2]. Щоб забезпечити стабільну роботу таких систем, необхідно додатково використовувати фільтри та стабілізатори напруги. Фільтрація пульсацій здійснюється через конденсатори або коливальний контур, що дозволяє підтримувати сталу напругу на виході, навіть якщо коливання амплітуди змінюються. Це критично важливо для тривалого функціонування енергозберігаючих систем, таких як сенсори або акумулятори. Система відстеження максимальної потужності дозволяє адаптувати систему збору енергії до змінних умов роботи автоматично налаштовуючи систему на роботу при максимальному виході енергії при різних амплітудах і частотах коливань.. На рис. 1 наведена досліджувана схема з'єднання п'єзогенератора з системою акумулювання енергії, вона складається з п'єзоелектричного матеріалу, що позначено як п'єзоелектрична ємність (C_p) і опір (R_p) з вихідною змінною напругою (U_p), підключеною до зовнішнього кола. Зовнішня схема складається з мостового випрямляча, для отримання вихідної постійної напруги (U), підключеної до згладжуючого конденсатора (C_L) і зовнішнього навантаження (R_L) [4].

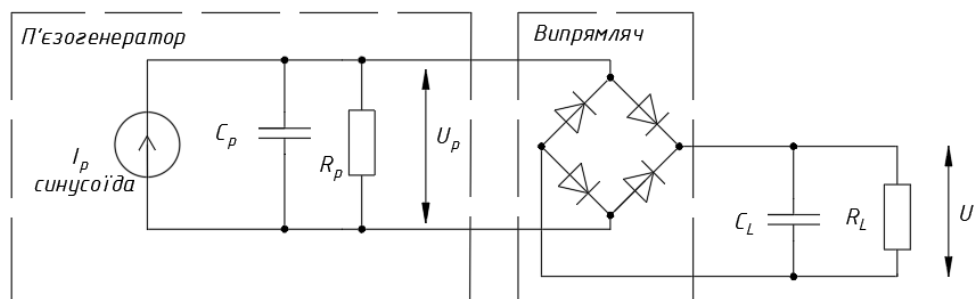


Рисунок 1 – Схема збору п'єзоелектричної енергії з повномостовим випрямлячем

Аналіз показує, що ефективність таких систем безпосередньо залежить від узгодження імпедансу між п'єзоелектричним елементом і навантаженням. Встановлено, що погане

узгодження може призвести до значних втрат потужності, що підтверджує необхідність точного налаштування електричних схем для кожної конкретної системи. Особливості підключення в технічних системах полягають в тому, що при інтеграції п'єзоелектричних перетворювачів у транспортні системи або перкусійних машин важливо враховувати механічні характеристики коливань і вібрацій. Виявлено, що багатопарові п'єзоелектричні елементи у поєднанні з оптимізованими електричними схемами дозволяють ефективно збирати енергію в умовах високих циклічних навантажень [5].

Висновки

У результаті дослідження визначено, що ефективність систем збору вібраційної енергії з п'єзоелектричних перетворювачів залежить від випрямлення, фільтрація, стабілізація напруги та узгодження імпедансу. Запропоновано повномостову схему збору енергії для збору низькочастотних коливань технічних систем, а також роботи перкусійних машин. Встановлено, що інтеграція системи відстеження максимальної потужності дозволяє адаптувати систему до змінних вібраційних умов, що підвищує ефективність збору енергії, таким чином дана система є перспективною для застосування в транспортних і промислових галузях, де вібрації можуть бути використані для генерації електричної енергії.

Список використаної літератури

1. Zhang, B., Liu, H., Zhou, S., & Gao, J. *A review of nonlinear piezoelectric energy harvesting interface circuits in discrete components*. Applied Mathematics and Mechanics 2022. Т. 43, №7. С. 1001-1026. URL: <https://doi.org/10.1007/s10483-022-2863-6> (дата звернення: 02.11.2025);
2. Al Ghazi, A., Ouslimani, A., Kasbari, A.-E. *Advances in Interface Circuits for Self-Powered Piezoelectric Energy Harvesting Systems: A Comprehensive Review*. Sensors 2025. Т. 25, №13. С. 4029. URL: <https://doi.org/10.3390/s25134029> (дата звернення: 12.11.2024);
3. Yang, H. *Piezoelectric energy harvesting interface circuit for small-size applications*. Measurement 2025. Т. 242. С. 116051. URL: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.116051> (дата звернення: 01.11.2025);
4. Новиков А., Сліденко В. Електромеханічна система рекуперації енергії вібраційних навантажень. Електромеханічні і енергозберігаючі системи 2024. Т. 3, №66. С. 8-12. URL: <https://doi.org/10.32782/2072-2052.2024.3.66.1> (дата звернення: 29.10.2025);
5. Chen, G.. *Belt-type low-frequency piezoelectric energy harvester for infrastructure vibrations*. Journal of Intelligent Material Systems and Structures 2025. Т. 36, №7. С. 455-467. URL: <https://doi.org/10.1177/1045389X251321972> (дата звернення: 28.10.2025).

ЗАСТОСУВАННЯ ПУЛЬСАЦІЙНИХ ТЕПЛОВИХ ТРУБОК ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ВІКОН

Вступ. Енергоефективність сучасних металопластикових вікон залежить, у першу чергу, від якості склопакету, який займає більше 80% площі вікна. Залишок площі вікна припадає на його поліетиленову (ПВХ) раму з певною кількістю повітряних каналів, яка має нижчу енергоефективність за склопакет. Крім того, при недоліках у встановленні віконної рами, або в процесі її старіння, осідання будівлі чи намокання зовнішньої теплоізоляції виникають теплові містки, через які холод зовнішнього середовища передається всередину приміщення, створюючи протяги та понижуючи температуру повітря. При цьому всередині приміщення зростає вологість, що викликає дискомфорт у людей, які у ньому перебувають. Це призводить до необхідності додаткового підігріву приміщень стандартною системою опалення, електричними (керамічними, інфрачервоними) нагрівачами, тепловентиляторами або кондиціонерами. В результаті витрати енергоносіїв на обігрів приміщення суттєво зростають.

Тому створення нових технічних рішень для вікон, що встановлюються, або для вже встановлених віконних систем на різних термінах експлуатації є доволі актуальними для підвищення їхньої енергоефективності, економії енергоресурсів та забезпечення комфортного перебування людей у приміщенні.

Метою дослідження є розроблення технічних рішень з застосування пульсаційних теплових трубок для підвищення енергоефективності металопластикових вікон шляхом їх встановлення у нові віконні рами, або у рами, що вже знаходяться в експлуатації.

Виклад матеріалу. Перевагами пульсаційних теплових трубок (ПТТ) у порівнянні зі звичайними гнітовими або термосифонами є простота та надійність конструкції, низька вартість, можливість надати трубці будь-якої форми, невеликі розміри та маса. Значна теплопровідність ПТТ досягається не звичайним випаровуванням рідини, а рухом парових та рідинних ділянок, які йдуть одна за одною, що є ефективнішим способом перенесення теплоти. У ПТТ немає ні капілярно-пористої структури, ні клапанів, ні гноту для переміщення теплоносія із зони нагрівання в зону конденсації. ПТТ нормально працюють при будь-якій орієнтації у просторі [1,2]. Практично ПТТ – це тонкостінна металева герметизована трубка малого діаметру, частково заповнена робочою рідиною, з якої повністю видалене повітря. Основною відмінністю ПТТ від класичної теплової трубки є наявність вигинів, внаслідок чого ПТТ може мати значну довжину [1].

Високу теплопровідність ПТТ забезпечує пульсаційний режим її роботи, при якому парові та рідинні ділянки починають рухатись внаслідок зростання тиску у парових ділянках під впливом зовнішньої температури в зоні випаровування. При цьому нагріті бульбашки рідини та пари переносять набуте тепло в зону конденсації. В зоні конденсації відбувається віддача тепла поверхні трубки, тиск у парових ділянках падає, але вони продовжують рух внаслідок значного перепаду тиску у парових ділянках зони випаровування. Цей процес повторюється і є швидкоплинним.

Малий діаметр, можливість прийняти будь-яку форму, значна довжина та висока теплопровідність ПТТ дають змогу використати їх для підвищення енергоефективності віконних рам шляхом прогріву рами у зоні її кріплення до вікна.

Для підтвердження цього за методикою, наведеною у [1], розрахована ПТТ з мідного тонкостінного капіляру зовнішнім діаметром 1,5 мм з теплоносієм у виді спиртоводяної суміші та була встановлена у віконний проріз розміром 1500x1550 мм зсередини кімнати. Вікно було металопластиковим однокамерним та мало значні містки холоду знизу і зліва від рами.

Оскільки в приміщенні для опалення використовувалась тепла підлога і її теплової потужності було недостатньо, то для компенсації теплових втрат під вікно встановлювався керамічний нагрівач потужністю 700 Вт.

Теплова трубка містила один повний виток по периметру віконної рами і мала загальну довжину 6500 мм, враховуючи ділянку нагрівання в зоні випаровування. Як елементи нагрівання використовувалися три потужні плоскі керамічні резистори по 90 Вт кожен, до яких через теплопровідну пасту КПТ хомутами приєднувалась вигнута змієвиком зона випаровування ПТТ. Резистори поміщалися у теплоізоляційний плоский кожух та приєднувались до терморегулятора.

Сама поверхня теплової трубки кріпилась до відкосів та підвіконника у кількох місцях без конкретних вимог до кріплення. Основною вимогою була необхідність забезпечити максимально можливе прилягання поверхні трубки до віконної рами.

Дослідження проводились в осінню пору у листопаді місяці протягом тижня вдень та вночі при зовнішніх температурах від +5 до -7 °С. Температура трубки контролювалась пірометром, а всередині приміщення – цифровим термометром. Також кожних 5 хвилин вимірювалась вологість повітря у приміщенні.

Отримані результати виявились такими. При використанні для компенсації теплових втрат з вікна керамічного нагрівача температура у приміщенні піднімалась з +20 до +24 °С, при цьому вологість зменшувалась з 60 до 38-40% і було відчутно певний дискомфорт при диханні та рух теплих і холодних повітряних потоків, спричинених роботою керамічного нагрівача, довжина якого (1 м) була меншою за ширину віконного прорізу. На початку роботи нагрівача спостерігалось запотівання вікон у кутах склопакету. Потужність споживання нагрівача за добу становила, в середньому, 4700 Вт.

При використанні для компенсації теплових втрат з вікна ПТТ температура у приміщенні зросла до +21 °С, вологість зменшилась, в середньому, на 5%. При цьому сумарна потужність споживання керамічних резисторів за добу становила біля 3000 Вт. Перебувати у приміщенні було доволі комфортно, а руху повітряних потоків не було відчутно взагалі. Запотівання вікон при роботі ПТТ протягом всього часу досліджень не спостерігалось.

Висновки. Як видно з проведених експериментів ПТТ у виді капіляру з мідним корпусом виявилась ефективнішою за керамічний нагрівач внаслідок того, що рівномірно прогрівала віконну раму та проріз по периметру у місці їх стику, що знівело роботу теплових містків та запобігло утворенню потоків холодного повітря, які виходили з нижньої частини вікна.

Застосування описаних ПТТ у віконних рамах до їх встановлення дасть змогу в майбутньому запобігати утворенню теплових містків і потоків холодного повітря шляхом регулювання температури самої ПТТ.

Список використаної літератури.

1. Ващишак І.Р., Доценко Є.Р. Проектування рекуператора на пульсаційних теплових трубках для об'єктів нафтогазового комплексу. *Науковий вісник ІФНТУНГ*. 2018. № 2(45). С. 16-23.
2. Ващишак І.Р., Ващишак С.П. Рекуператор на пульсаційних теплових трубках з мікропроцесорним управлінням. *Науковий вісник НЛТУ*. 2019. № 29.5. С. 107–110.

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЗАКРУЧЕНОГО ПОТОКУ У ОБЕРТОВИХ ПЕЧАХ ДЛЯ СПАЛЮВАННЯ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ

Вступ

Енергетичне використання твердих побутових відходів (ТПВ) є одним із напрямів розвитку сучасних технологій енергозбереження. Перероблення відходів шляхом термічного знешкодження у спеціальних установках дозволяє зменшити навантаження на полігони та отримати корисну теплову енергію. За даними оглядів [1,2], частка термічної утилізації ТПВ у розвинених країнах перевищує 30 %, що підтверджує ефективність цієї технології у рамках концепції Waste-to-Energy (WtE), а інноваційні методи, наприклад, використання плазмових технологій для знезараження ТПВ, обмежено термічною стійкістю матеріалів [3,4]. Підвищення якості процесу горіння значною мірою визначається газодинамічними характеристиками потоку у камері спалювання. Одним із ефективних напрямів удосконалення є використання закручених потоків, що забезпечує стабільність полум'я, інтенсивніше перемішування і більш рівномірний розподіл температур.

Мета та завдання дослідження

Метою дослідження є створення математичної моделі руху газів у барабанній печі з попереднім закручуванням потоку для визначення впливу гідродинамічних параметрів на структуру течії та енергоефективність процесу спалювання ТПВ. Основними завданнями є: аналіз фізичних процесів у реакторі; формулювання рівнянь руху і неперервності у циліндричних координатах; визначення граничних умов, що враховують обертання барабана і тангенціальне введення повітря; чисельне розв'язання рівнянь; аналіз розподілу швидкостей газу.

Методика дослідження

Для моделювання використовувались рівняння Нав'є–Стокса в циліндричній системі координат, що описують осьову, радіальну та обертальну складові швидкості газу. Система рівнянь перетворювалась до безрозмірного вигляду, що дало змогу застосувати єдиний масштаб аналізу. Як граничні умови враховано нульові відносні швидкості на стінках печі (умови прилипання), заданий профіль швидкості на вході та умову стабілізованої течії на виході. Для чисельного розв'язання застосовано алгоритм SIMPLE [5], що базується на послідовному уточненні тиску та швидкостей у сіткових комірках. Обчислення виконувались для барабанної печі довжиною 10 м, діаметром 2,4 м, із температурою газу до 1100 °С. Для перевірки збіжності розрахунків використовується обчислювальна сітка з адаптацією у прикордонних шарах. Додаткове порівняння проводилося з CFD-моделями, описаними у [6,7].

Основні результати дослідження

Розрахунки показали, що введення завихрювача на вході істотно впливає на формування швидкісного поля у печі. Осьова швидкість газу у зоні вхідного патрубку має максимум поблизу стінки, що свідчить про підсилене перемішування потоку. Далі спостерігається вирівнювання профілю, а в центральній частині формується зона стабільного руху з максимумом осьової швидкості. Радіальна складова швидкості газу характеризується наявністю зони відтоку від стінок, яка поступово зникає після перебудови профілю швидкостей. Обертальна швидкість максимальна біля завихрювача та поступово зменшується, що узгоджується з [6].

Збільшення інтенсивності закрутки призводить до зменшення локальних зон перегріву та сприяє більш повному вигорянню ТПВ. Тангенціальне введення потоку газу забезпечує

кращу рівномірність температури в поперечному перерізі. Порівняльний аналіз показав, що для печей із завихрювачем питома теплова потужність може зростати на 10–15 % за рахунок покращення процесів теплообміну. Отримані дані узгоджуються з висновками у [7], де наголошено на важливості правильної дискретизації рівнянь течії для опису ефектів у системах із закрученим рухом газу.

Висновки

Розроблена математична модель газодинаміки обертової печі з початковим закручуванням потоку дозволяє кількісно оцінити вплив геометричних і режимних параметрів на структуру руху газів у камері спалювання. Закручування потоку підвищує стабільність процесу горіння, зменшує нерівномірність температурного поля та покращує теплообмін між газовим середовищем і твердою фазою. Отримані результати відповідають сучасним уявленням про газодинаміку термічних реакторів і можуть бути використані для проєктування нових установок термічної утилізації, модернізації існуючих печей та створення цифрових двійників у системах енергетичного моніторингу.

Список використаних джерел

1. United Nations Environment Programme, International Solid Waste Association. Global Waste Management Outlook 2024. Nairobi: UNEP, 2024. DOI: <https://doi.org/10.18356/9789210027596>.
2. Eurostat. Municipal waste statistics. Luxembourg: European Commission, 2025. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Municipal_waste_statistics.
3. Voloshyn, O., Potapchuk, I., Zhevzyk, O., Yemelienko, V., Zhovtonoha, M., Sekar, M., Dhunnoo, N. Experimental study of the thermal reaming of the borehole by axial plasmatron. Mining of mineral deposits, 2019, 13, Iss. 1, 103-110.
4. Voloshyn, O. I., Potapchuk, I. Y., Zhevzyk, O. V. Influence of the heat-transfer stream pressure on the surface of the rock in a process of the thermal reaming of the borehole. Scientific Bulletin of National Mining University, 2018, 2, 53-59.
5. Patankar S. Numerical heat transfer and fluid flow. – New York: Hemisphere Publishing, 1980. – 197 p.
6. Cecílio D.M., Mateus M., Ferreira A.I. Industrial Rotary Kiln Burner Performance with 3D CFD Modeling. Fuels, 2023, 4, 454–468. DOI: <https://doi.org/10.3390/fuels4040028>.
7. Versteeg H.K., Malalasekera W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method. 2nd ed. Pearson Education, 2007. 503 p.

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ АЛГОРИТМИ ТА BIG DATA ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ СПІЛЬНОГО ДИСПЕТЧЕРСЬОГО УПРАВЛІННЯ СИСТЕМАМИ

Анотація: У роботі проаналізовано виклики сучасних енергетичних систем, пов'язані з інтеграцією відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) та необхідністю гнучкого управління. Досліджено застосування технологій Big Data для збору та обробки масивів даних з "розумних" мереж (Smart Grids) [2]. Розглянуто ключові класи інтелектуальних алгоритмів (машинне навчання, оптимізаційні та прогностичні моделі) для вирішення задач спільного диспетчерського управління [5]. Запропоновано концептуальну модель, що використовує підходи Віртуальних електростанцій (VPP) для автоматичної оптимізації роботи гетерогенних джерел енергії, включаючи системи накопичення.

Вступ: Сучасна енергетика переживає фундаментальну трансформацію. З одного боку, зростає частка відновлюваних джерел енергії, таких як сонячні та вітрові станції, що є екологічно чистими, але мають стохастичний (нестабільний) характер генерації. З іншого боку, з'являються нові типи споживачів та активів (наприклад, електромобілі, системи накопичення енергії). Традиційні методи диспетчеризування, розраховані на великі централізовані електростанції, виявляються неефективними для управління мультиенергетичними системами, що складаються з десятків, сотень або навіть тисяч дрібних, географічно розподілених джерел. Виникає задача спільного диспетчерування – як автоматично та оптимально узгодити роботу всіх цих різноманітних джерел (газових турбін, ВДЕ, акумуляторів, когенераційних установок, тощо) в реальному часі, щоб забезпечити надійність, ефективність та мінімальну вартість енергії. Метою даної роботи є аналіз потенціалу використання інтелектуальних алгоритмів та технологій обробки великих даних для створення автоматизованих систем спільного диспетчерського управління.

Основна частина: Для ефективного управління сучасними енергосистемами критично необхідні дані. Концепція «розумних мереж» передбачає насичення інфраструктури датчиками, що генерують величезні потоки інформації [2]. Ці дані повністю відповідають класичному визначенню Big Data [1], володіючи характеристиками об'єму (Volume), що надходить з мільйонів розумних лічильників, SCADA-систем та метеостанцій; швидкості, яка вимагає обробки в реальному часі для балансування частоти; різноманітності, оскільки включають числові часові ряди, текстові звіти та метеопрогнози; та достовірності, що змушує застосовувати методи очищення та заповнення пропусків. Якісна обробка цих масивів даних дозволяє створити повноцінного «цифрового двійника» енергосистеми та здійснити перехід від реактивного до проактивного, тобто прогнозного, управління.

На основі оброблених великих даних в дію вступають інтелектуальні алгоритми, які вирішують ключові задачі диспетчеризації. Основою ефективного управління є точний прогноз, де сьогодні домінують методи машинного навчання. Сюди належить як прогнозування споживання, де моделі від класичних ARIMA до складних нейронних мереж типу LSTM здатні прогнозувати попит на різних рівнях, так і прогнозування генерації ВДЕ, що вимагає аналізу метеорологічних даних для оцінки майбутнього виробітку [3]. Українські дослідники також підтверджують ефективність ансамблевих моделей, що поєднують різні алгоритми для підвищення точності прогнозу [4].

Ядром диспетчерського управління є алгоритми оптимізації. Їх фундаментальна задача – знайти оптимальний режим роботи всіх джерел, мінімізуючи загальну вартість генерації при дотриманні жорстких технічних та екологічних обмежень, як-от баланс потужності та пропускна здатність мереж. Оскільки ця задача є складною та

багатовимірною, для її вирішення в прийнятний час часто залучають метаевристичні алгоритми, такі як генетичні алгоритми чи алгоритми рою часток (PSO).

Для миттєвої реакції на непередбачувані відхилення, наприклад, різке падіння генерації СЕС через хмарність, розробляються системи на основі навчання з підкріпленням (Reinforcement Learning). У цій парадигмі «агент» (система управління) самостійно вчиться приймати оптимальні миттєві рішення, як-от активація систем накопичення, базуючись на поточному стані мережі та прагнучи максимізувати «винагороду» у вигляді стабільності системи.

Об'єднання Big Data та інтелектуальних алгоритмів призводить до створення Віртуальних Електростанцій (VPP). VPP є, по суті, програмним комплексом-агрегатором, що об'єднує потужності багатьох різномірних та розподілених джерел – сонця, вітру, біогазу, систем накопичення та керованого навантаження. Для ринку та оператора системи VPP представляє всі ці активи як єдиний, прогнозований та керований об'єкт. «Інтелектуальний мозок» VPP, базуючись на вищеописаних алгоритмах, виконує автоматичне спільне диспетчеризування: він прогнозує генерацію, оптимізує графіки роботи активів для максимізації прибутку чи забезпечення надійності та автоматично віддає команди управління. Таким чином, VPP перетворює хаотичний набір нестабільних джерел на гнучкий та цінний енергетичний актив.

Висновок: У підсумку, перехід до мультиенергетичних систем з високою часткою ВДЕ робить традиційні підходи до диспетчеризування неефективними. Саме синергія технологій Big Data для збору всеосяжних даних [1] та інтелектуальних алгоритмів для їх обробки [5] є ключовим фактором автоматизації управління. Концепція Віртуальної Електростанції (VPP) виступає практичною реалізацією такого підходу, дозволяючи агрегувати розподілені ресурси. Подальші дослідження мають бути спрямовані на підвищення точності прогностичних моделей, швидкодії оптимізаційних алгоритмів для роботи в жорсткому реальному часі та, що важливо, на забезпечення кібербезпеки таких складних автоматизованих систем.

Список використаної літератури:

1. Al-Naima, F., & Al-Ghamdi, S. G. (2023). Big Data Analytics in Smart Grids: A Review. *Energies*, 16(14), 5406. Режим доступу: <https://doi.org/10.3390/en16145406>
2. Бугазіанус, С. (2024). SMART GRID АНАЛІЗ ЯК ІННОВАЦІЙНИЙ ПІДХІД ДО УПРАВЛІННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЮ БЕЗПЕКОЮ УКРАЇНИ В УМОВАХ ВОЄННОГО СТАНУ. Теоретичні та прикладні питання державотворення, (33). Режим доступу: <https://doi.org/10.35432/tisb332025330148>
3. Bedi, G., & Tosun, S. (2024). A systematic review of deep learning and machine learning for short-term load forecasting in smart grids. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 41, 100958. Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2023.100958>
4. Паляник, В. М., Костишин, С. О., & Желізняк, М. А. (2024). ПРОГНОЗУВАННЯ СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ З ДОПОМОГОЮ АНСАМБЛЮ МОДЕЛЕЙ. Інформаційні системи та мережі, (78), 28-36. (Вісник Національного університету «Львівська політехніка»). Режим доступу: <https://doi.org/10.23939/sisn2024.78.028>
5. Zhang, Z., Zhang, D., & Qiu, R. C. (2020). A review of machine learning for new generation smart dispatch in power systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 35(5), 4001-4010. Режим доступу: <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2020.2998495>

В.В. Безкоровайний, асп.,
А.М. Ганжа, д-р техн. наук, проф., **Н.А Марченко**, канд. техн. наук, доц.,
 Національний технічний університет
 "Харківський політехнічний інститут"

АНАЛІЗ ВАРІАНТІВ РЕКОНСТРУКЦІЇ РЕГЕНЕРАТИВНИХ ПОВІТРОНАГРІВАЧІВ МЕТАЛУРГІЙНОГО ВИРОБНИЦТВА НА ОСНОВІ CFD МОДЕЛЮВАННЯ

Питома частина витрати природного газу в доменному виробництві України складає 70 – 90 м³ на тонну чавуну. Питомі витрати умовного палива – до 550 кг на 1 т чавуну. На закордонних підприємствах в доменному виробництві природний газ практично не використовується, а витрати умовного палива є значно меншими. Частка витрат на паливо та електричну енергію в собівартості товарної продукції металургії складає в Україні 40 – 60 %, а в США, Німеччині, Японії близько 28 – 35 % [1].

Доля коксу в собівартості металопродукції складає приблизно 20 %. У цей час питома витрата коксу на металургійних підприємствах України становить 400 – 500 кг/т чавуну. На європейських підприємствах цей показник сягає 300 – 350 кг/т чавуну. Вихід доменного газу становить у середньому від 2500 до 1500 м³/т чавуну.

Регенеративні повітрянагрівачі доменних печей призначені для високотемпературного нагріву великих обсягів дуттьового повітря за рахунок теплоти доменного газу. Вони являють собою споруди висотою до 60 м і діаметром до 9 м. Через періодичність роботи теплообмінників даного типу, для кожної доменної печі використовують декілька апаратів, об'єднаних у блок (від трьох до п'яти) [2].

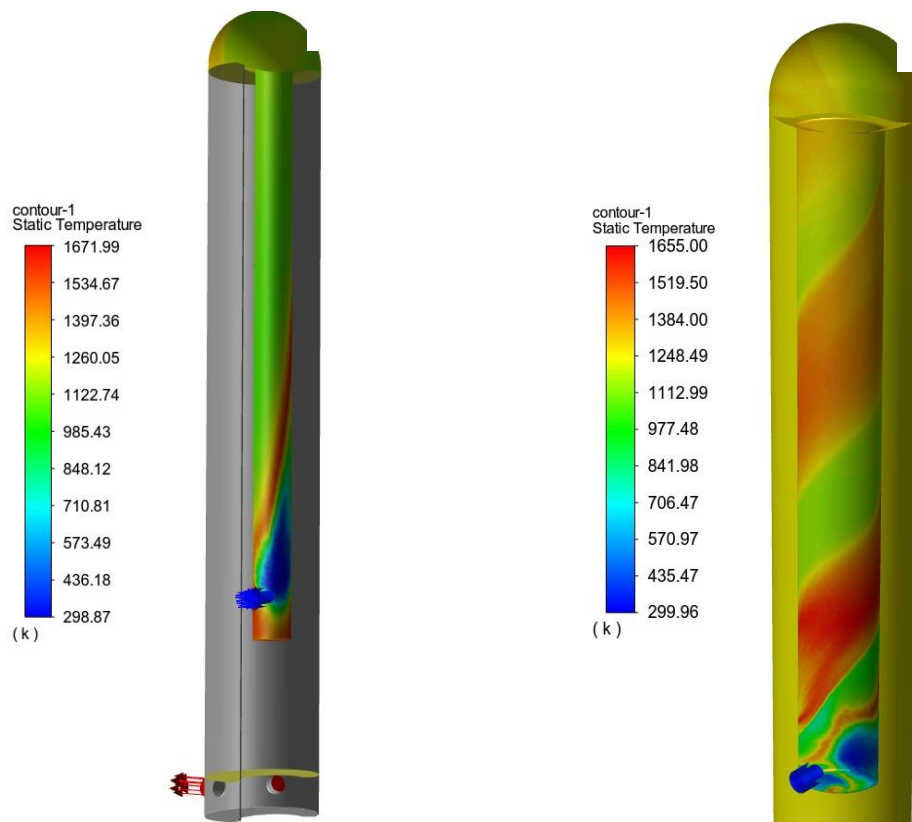
Повітрянагрівач складається з камери горіння та насадкової камери. Насадка ПН являє собою покладені один на одного блоки з каналами для проходу теплоносія. Насадка розташовується на піднасадковому пристрої, виконаному з жароміцного чавуну. Зовні ПН закривається кожухом з низьколегованої сталі. В даний момент часу на багатьох металургійних заводах застосовуються доменні повітрянагрівачі з внутрішньою камерою горіння, основною особливістю яких є розміщення в одному корпусі паралельно камери насадки та камери горіння. Також у даних повітрянагрівачах застосовується пальник за типом «труба в трубі», в яку подається доменний газ (або суміш доменного газу з природним/коковим газом) та вентиляторне повітря горіння.



а) Камера горіння «овальної форми» площею 3,4 м², висотою - 32340 мм та тангенціальним підведенням газоповітряної суміші
 б) Камера горіння «чечевиної форми» площею 4,79 м², висотою – 32340 мм та тангенціальним підведенням газоповітряної суміші

Рисунок 1 – Форми насадок

Мета роботи: у результаті аналізу підібрати оптимальну форму перерізу камери горіння з достатньо ефективним згорянням палива. Виконати об'єктивну оцінку ефективності камери горіння. Форми насадок, які пропонуються показані на рис 1. Аналіз температурного поля стінки кладки камери горіння на основі CFD моделювання приведений на рис. 2



а) Варіант насадки рис. 1.а

б) Варіант насадки рис. 1.б

Рисунок 2 – Розподіл температур у пристінному шарі зони горіння

Таким чином, аналіз досліджених варіантів виявив низку істотних недоліків класичної камери горіння: нерівномірне температурне поле кладки камери горіння - особливо її нижньої частини; великі температурні градієнти на протилежній стінці горіння камери по осі пальника; вихрове, пристінне згоряння газоповітряної суміші, що також призводить до великих температурних градієнтів у стінці кладки камери горіння.

Розроблені методи і засоби можуть бути використані і для інших варіантів конструкцій повітрянагрівачів.

Список використаної літератури

1. Ganzha, A., Zaiets, O., Koshelnik, A. (2017). Analysis of efficiency and reliability of blast-furnace process waste heat recovery systems // Technology Audit and Production Reserves, 2017, N 1(33), P. 49–54.
2. Cronert W. Der Einfluss der Gitterwerksqualitaet auf Konstruktion und Waermehaushalt des Winderhitzer // Sprechsaal 116. – 1983. – №4. – S. 275–280.

ОГЛЯД ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ БЕЗКОЛЕКТОРНИХ ТЯГОВИХ ДВИГУНІВ ЛОКОМОТИВІВ

Підвищення енергоефективності безколекторних тягових двигунів сприяє не лише зменшенню енерговитрат, а й підвищенню надійності, довговічності та екологічності локомотивів, що є ключовим фактором розвитку сучасного залізничного транспорту.

Одним із ключових напрямів підвищення енергоефективності безколекторних тягових двигунів (BLDC та PMSM) є оптимізація системи керування [1, 2]. Використання векторного керування (FOC, Field-Oriented Control) забезпечує точне регулювання магнітного поля та крутного моменту, що дає змогу мінімізувати втрати енергії у процесі роботи. Альтернативним підходом є пряме керування моментом (DTC, Direct Torque Control), яке забезпечує високу швидкодію системи та зменшує енергетичні втрати завдяки скороченню кількості комутацій. Додаткове підвищення ефективності досягається за рахунок застосування адаптивних та прогнозних алгоритмів керування, які автоматично коригують параметри регулювання відповідно до зміни навантаження та швидкості обертання.

Суттєвий вплив на енергоефективність мають втрати у силових перетворювачах [3, 4]. Заміна традиційних кремнієвих транзисторів на SiC (карбід кремнію) або GaN (нітрид галію) прилади дозволяє знизити втрати при комутації та підвищити робочі частоти [5]. Крім того, застосування високоякісних магнітопроводів із нанокристалічних або аморфних сталей сприяє зменшенню втрат на гістерезис та вихрові струми [6]. Оптимізація конструкції статора і ротора забезпечує більш рівномірний розподіл магнітного потоку та мінімізацію паразитних струмів [7].

Важливою складовою енергоефективної системи є оптимізація живлення тягового двигуна. Реалізація режиму рекуперативного гальмування дозволяє повертати частину енергії у живильну мережу або акумулятор [8]. Використання енергоефективних DC/DC-перетворювачів із мінімальними комутаційними втратами сприяє зменшенню енергоспоживання. Сучасні транспортні системи також впроваджують інтелектуальне керування енергоспоживанням, що координує роботу двигуна з іншими підсистемами засобу транспорту [9].

Енергетичні втрати в обмотках можна зменшити за рахунок оптимізації траєкторії струму, що дозволяє мінімізувати втрати у міді [10, 11]. Регулювання кута випередження комутації залежно від швидкості обертання ротора забезпечує оптимальне використання магнітного поля. Зменшення гармонічних спотворень струму за рахунок удосконалення алгоритмів широтно-імпульсної модуляції також сприяє підвищенню коефіцієнта корисної дії системи [12].

Підтримання оптимального температурного режиму має важливе значення для стабільної роботи двигуна. Використання систем активного охолодження (рідиною або термоелектричними елементами) дозволяє уникати перегріву обмоток і підшипників [13]. Інтегровані сенсорні системи моніторингу температури забезпечують можливість адаптивного коригування режимів роботи для запобігання перевантаженням. Додатково впровадження цифрових двійників двигунів та штучного інтелекту дає змогу прогнозувати втрати, визначати оптимальні режими роботи й підвищувати загальну енергоефективність системи [14, 15].

Таким чином, підвищення енергоефективності безколекторних тягових двигунів може бути досягнуто за рахунок комплексного впровадження апаратних, алгоритмічних та інтелектуальних технологічних рішень. Застосування сучасних методів керування, енергоефективних напівпровідникових елементів, рекуперації енергії гальмування та систем

діагностики дає змогу істотно зменшити енергоспоживання та підвищити надійність транспортних систем.

Список використаних джерел:

1. Kadhim Q. S., Swadi M., Mahdi A. J., Joodi M. A., Tuaimah F. M., Mohammed M. E., Abbas A. H., Salem M. Optimum design of bearingless brushless DC motor modeling with dual loop controller using dragonfly optimizers. *e-Prime – Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*. 2025. Vol. 11. 100942. DOI: 10.1016/j.prime.2025.100942.
2. Kethiri M. F., Charrouf O., Betka A., Salman M., Boccaletti C. Minimizing power losses in BLDC motor drives through adaptive flux control: A real-time experimental study. *Actuators*. 2025. Vol. 14, Iss. 8. 395. DOI: 10.3390/act14080395.
3. Plakhtii O. A., Nerubatskyi V. P., Hordiienko D. A., Khoruzhevskyi H. A. Calculation of static and dynamic losses in power IGBT-transistors by polynomial approximation of basic energy characteristics. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2020. No. 2 (176). P. 82–88. DOI: 10.33271/nvngu/2020-82.
4. Plakhtii O., Nerubatskyi V., Hordiienko D., Sushko D., Syniavskyi A., Shelest D. Thermal-powerloss approximation method for determination of efficiency in semiconductor devices. *2022 IEEE 41st International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). Proceedings*. 2022. P. 456–461. DOI: 10.1109/ELNANO54667.2022.9926756.
5. Nerubatskyi V., Plakhtii O., Hordiienko D., Khoruzhevskyi H. Prospects for the development of power electronics by application of technologies for production of power semiconductor switches based on silicon carbide. *International scientific journal «Industry 4.0»*. 2020. Vol. 5, Iss. 4. P. 170–173.
6. Ishikawa T., Takahashi K., Viet Ho Q., Matsunami M., Kurita N. Analysis of novel brushless DC motors made of soft magnetic composite core. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2012. Vol. 48, Iss. 2. P. 971–974. DOI: 10.1109/TMAG.2011.2176469.
7. Patel A. N., Doshi P. J., Mahagaokar S. C., Panchal T. H. Optimization of cogging torque in interior permanent magnet synchronous motor using optimum magnet v-angle. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2023. No. 6. P. 16–20. DOI: 10.20998/2074-272X.2023.6.03.
8. Nerubatskyi V. P., Hordiienko D. A. Features of the use recuperation braking on electric rolling stock of DC railways. Тези III міжнародної науково-практичної конференції «Рухомий склад нового покоління: із XX в XXI сторіччя» (Харків, УкрДУЗТ, 22–23 листопада 2023 р.). Харків: УкрДУЗТ, 2023. С. 83–85.
9. Teimoori Z., & Yassine, A. A review on intelligent energy management systems for future electric vehicle transportation. *Sustainability*. 2022. Vol. 14, Iss. 21. 14100. DOI: 10.3390/su142114100.
10. Nerubatskyi V. P., Hordiienko D. A. Method of determining additional thermal losses in the windings of electric motors. Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Інноваційні технології в світлотехніці та електроенергетиці» (Харків, ХНУМГ імені О. М. Бекетова, 16–17 травня 2024 р.). Харків: ХНУМГ імені О. М. Бекетова, 2024. С. 68–69.
11. Nerubatskyi V. P., Hordiienko D. A. Determination of additional thermal losses from higher harmonics in AC motors windings. Тези стендових доповідей та виступів учасників 34-ї міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті» (Харків, УкрДУЗТ, 29 жовтня 2021 р.). *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2021. № 3 (додаток). С. 18–19.
12. Нерубацький В. П., Плахтій О. А., Цибульник В. Р., Гордієнко Д. А., Хоружевський Г. А. Аналіз показників енергоефективності автономних інверторів напруги з імпедансною і квазіімпедансною ланками у вхідному колі при застосуванні різних алгоритмів модуляції. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2020. Том 25, № 3. С. 19–31. DOI: 10.18664/iksz.v25i3.214089.
13. Gronwald P.-O., Kern T. A. Traction motor cooling systems: A literature review and comparative study. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. 2021. Vol. 7, Iss. 4. P. 2892–2913. DOI: 10.1109/TTE.2021.3075844.
14. Shen Z., Arraño-Vargas F., Konstantinou G. Artificial intelligence and digital twins in power systems: Trends, synergies and opportunities. *Digital Twin*. 2024. Vol. 1, Iss. 3. 11. DOI: 10.12688/digitaltwin.17632.2.
15. Abdessadak A., Ghennioui H., Thirion-Moreau N., Elbhiri B., Abraim M., Merzouk S. Digital twin technology and artificial intelligence in energy transition: A comprehensive systematic review of applications. *Energy Reports*. 2025. Vol. 13. P. 5196–5218. DOI: 10.1016/j.egyr.2025.04.060.

СТРУКТУРА ТА ПОТЕНЦІАЛ ГІБРИДНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ОБ'ЄКТІВ КОМУНАЛЬНОЇ ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКИ

Вступ. Сучасна енергетична система України характеризується високою енергоємністю системи комунального теплопостачання яка залежить від централізованих джерел електроенергії. В умовах бойових дій та часткового руйнування критичної енергетичної інфраструктури України й дефіцит енергоносіїв підвищують актуальність створення автономних та надійних енергоефективних систем електропостачання. В той же час стохастичний характер споживання електроенергії об'єктами комунальної теплоенергетики та її генерації в гібридних системах ускладнює підтримання рівноваги між генерацією та споживанням [1] З огляду на вище наведене тема дослідження є актуальною.

Мета роботи. Визначити структуру та потенціал гібридної системи електропостачання об'єктів комунальної теплоенергетики.

Матеріал та результати роботи. Аналіз графіків споживання електроенергії електрообладнання котельнями показує, що навантаження має виражену сезонну та добову нерівномірність. Максимальні обсяги споживання мають місце в опалювальний період і у вечірні години, тоді як у літні місяці та нічні години потужність різко знижується [2]. Наявна стохастична структура електроспоживання вимагає застосування адекватних системи електропостачання. У даній роботі розглядається гіпотеза, що прийнятним варіантом є застосування гібридної мережі електропостачання у якій когенераційні установки забезпечують базове навантаження, а фотоелектрична станція, вітрова електроустановка й система накопичення електроенергії компенсують пікові коливання [3].

В результаті дослідження визначено структуру та потенціал гібридної системи електропостачання об'єктів комунальної теплоенергетики. Найбільш прийнятна структура такої системи поєднує в собі наступні джерела енергії: когенераційні установки (газотурбінні, поршневі); відновлювані джерела енергії (сонячні панелі, вітрові установки, біогазові установки); системи акумуляції та зберігання енергії; мережеве електропостачання з можливістю роботи у режимі «острова». Ця структура здатна забезпечувати стійку та постійну роботу котелень і теплових пунктів навіть за умов знеструмлення централізованих електромереж [4].

Використання фотоелектричних сонячних систем та вітрової генерації у складі гібридних систем електропостачання є технічно доцільним і економічно ефективним рішенням для зменшення споживання енергоносіїв та зниження викидів вуглекислого газу та покращення екологічних показників. Основні чинники, що визначають потенціал впровадження гібридних систем: наявна тепла інфраструктура та стабільний попит на теплову енергію; доступ до паливних ресурсів (природний газ, біомаса, біогаз); технічна можливість синхронізації з електромережею; економічна доцільність експлуатації когенераційних модулів потужністю 0,5–5 МВт електричної енергії.

Висновки. Пропонована гібридна система електропостачання об'єктів комунальної теплоенергетики забезпечує надійність та автономність їх роботи.

Список використаної літератури

1. Федірко М., Бруханський Р., Брич Василь, Олішинська Руслана, Модернізація електроприводу насосних агрегатів мережі централізованого теплопостачання в контексті підвищення їх енергоефективності
2. М. Федірко, М. Горлачук, О. Завитій, Олександр Кошпаренко. ВИЗНАЧЕННЯ СТРУКТУРИ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ СПОЖИВАНОЇ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ НАСОСНИХ АГРЕГАТІВ МЕРЕЖІ ЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ТЕПЛОПОПОСТАЧАННЯ В КОНТЕКСТІ ПРОВЕДЕННЯ ЕНЕРГОАУДИТУ.
3. M. Kuznietsov, O. Melnyk. THE INFLUENCE OF INSTABILITY CONSUMPTION ON THE HYBRID ENERGY SYSTEM BALANCE.
4. Moh'd Sami S. Ashhab, Hazem Kaylani, Abdallah Abdallah. PV solar system feasibility study.

ОСОБЛИВОСТІ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ЛОКАЛЬНОЇ МЕРЕЖИ З КОМПЕНСАТОРОМ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

Вступ.

У сучасних локальних електричних мережах, особливо тих, що включають споживачів нелінійного характеру та генеруючі установки на основі відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), усе більш актуальною є проблема погіршення показників якості електроенергії. Нелінійні навантаження формують вищі гармоніки струму й напруги, що збільшує теплові втрати, спричиняє додаткове навантаження на силові обладнання та може створювати резонансні явища.

Додатково виробники на базі ВДЕ генерують змінні потоки реактивної потужності, що призводить до коливань напруги у точці спільного приєднання (РСС) та ускладнює підтримання нормативних вимог згідно EN 50160 та IEC 61000-2-4.

Тому під час математичного опису локальної мережі важливо враховувати:

- наявність гармонічних складових;
- коливання та перетоки реактивної потужності;
- внутрішній опір, «жорсткість» та структуру мережі;
- роботу пристроїв компенсації реактивної потужності, серед яких особливо важливими є STATCOM/SVG.

SVG (Static Var Generator), також відомий як STATCOM, — це силовий перетворювач на основі VSC (Voltage Source Converter), який регулює реактивну потужність та стабілізує напругу у РСС.

Концепція відповідає нормативам IEC 61000-3-6, IEEE Std 1453 та IEEE Std 1031 [5–7].

Призначення SVG у локальній мережі:

- підтримання напруги у РСС в межах, визначених EN 50160 4
- компенсацію реактивної потужності навантаження (Q_L)
- можливість придушення небалансу та гармонік (за потреби)

Компенсатор забезпечує:

- зменшення відхилень напруги $\Delta U < \pm 10\%$ згідно EN 50160 4
- покращення $\cos \varphi$ до рівня > 0.95
- зменшення циркуляцій реактивної потужності у мережі

Метою роботи. Представлення математичного опису компенсатора реактивної потужності підключеного в локальну мережу з ВДЕ.

Матеріали досліджень. Локальна електрична мережа представляється у вигляді еквівалентної схеми Тевенена із внутрішнім опором мережі $Z_g = R_g + jX_g$, відповідно до підходів, описаних в IEC 60909 та IEEE Std 399-1997 [1-2].

Всі параметри якості електричної енергії оцінюються у **точці спільного приєднання (РСС — Point of Common Coupling)** згідно вимог IEC 61000-4-30 та EN 50160 [3-4].

Загальний баланс потужності у РСС описується виразами:

$$P_g(t) = P_L(t) - P_{PV}(t) - P_{ESS}(t) + P_{loss}(t),$$

$$Q(t) = Q_L(t) - Q_{PV}(t) - Q_{ESS}(t) + Q_{loss}(t),$$

де P_g, Q_g — потужність обміну з мережею, P_L, Q_L — потужність навантаження, P_{PV}, Q_{PV} — потужність СЕС, P_{ESS}, Q_{ESS} — потужність системи накопичення енергії.

Втрати у лініях визначаються наближеними рівняннями:

$$P_{loss}(t) \approx \frac{R_{\Sigma}}{U_{PCC}^2} (P_{flow}^2 + Q_{flow}^2), \quad Q_{loss}(t) \approx \frac{X_{\Sigma}}{U_{PCC}^2} (P_{flow}^2 + Q_{flow}^2)$$

Для математичного опису локальної системи представимо математичну модель компенсатора реактивної потужності.

Баланс реактивної потужності у РСС з урахуванням наявності компенсатора складатиме:

$$Q_g(t) = Q_L(t) - Q_{SVG}(t) + Q_{loss}(t),$$

де $Q_{SVG}(t)$ керується інвертором STATCOM.

Динаміка трифазного інвертора через L-фільтр описується рівняннями

$$\begin{aligned} L \frac{di_d}{dt} &= -Ri_d + \omega Li_q + u_{d inv} - u_d, \\ L \frac{di_q}{dt} &= -Ri_q + \omega Li_d + u_{q inv} - u_q, \end{aligned}$$

де i_d, i_q — складові струму SVG, $u_{d inv}, u_{q inv}$ — вихідна напруга інвертор, u_d, u_q — напруга мережі у dq-просторі [8-9]

Активна і реактивна потужності:

$$P_{SVG} = \frac{3}{2} u_d i_d, \quad Q_{SVG} = -\frac{3}{2} u_d i_q$$

Компенсатор працює переважно у реактивному режимі:

$$P_{SVG}(t) \approx 0, \quad Q_{SVG} - \text{швидко регулюється}$$

Обмеження за потужністю перетворювача відповідно до IEEE Std 1676 [10]:

$$P_{SVG}^2(t) + Q_{SVG}^2(t) \leq S_{SVG MAX}^2$$

Синхронізація з мережею здійснюється **PLL** (Phase-Locked Loop), рекомендованою у IEEE Std 1547-2018 [2].

ПІ-регулятори для осей d та q з компенсацією перехресних зв'язків:

$$\begin{aligned} u_{d inv} &= u_d + Ri_d^* - \omega Li_q^* + k_{pd}(i_d^* - i_d) + k_{id} \int (i_d^* - i_d) dt, \\ u_{q inv} &= u_q + Ri_q^* - \omega Li_d^* + k_{pq}(i_q^* - i_q) + k_{iq} \int (i_q^* - i_q) dt. \end{aligned}$$

Референс реактивної потужності:

$$Q_{SVG}^*(t) = \frac{V_{ref} - V_{PCC}(t)}{R_Q}$$

де R_Q визначає “жорсткість” утримання напруги.

Перехід до бажаного i_q :

$$i_q^*(t) = -\frac{2}{3} \frac{Q_{SVG}^*(t)}{u_d(t)}$$

Пріоритизація реактивної потужності.

Для дотримання стандартів напруги:

Якщо $\sqrt{P^2 + Q^2} > S_{max} \Rightarrow P$ обмежити, Q залишити
Ця стратегія рекомендована у мережах з ВДЕ

Висновки

У локальних мережах з ВДЕ математичне моделювання повинно враховувати не лише генераційні процеси та характеристики навантаження, але й наявність гармонічних складових, коливання реактивної потужності та роботу систем її компенсації. SVG є одним із найефективніших засобів стабілізації напруги та регулювання реактивної потужності в РСС. Його детальна математична модель повинна бути інтегрована у динамічні розрахунки локальних мікромереж, що дозволить оцінювати стійкість, якість електроенергії та режими взаємодії генерації, накопичувачів та компенсаторів.

Список використаних джерел:

1. IEC 60909-0:2016, *Short-circuit currents in three-phase a.c. systems*.
2. IEEE Std 399-1997, *IEEE Recommended Practice for Industrial and Commercial Power Systems Analysis*.
3. IEC 61000-4-30:2015, *Power quality measurement methods*.
4. EN 50160:2010, *Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems*.
5. IEC 61000-3-6:2008 – *Assessment of emission limits for the connection of distorting installations*.
6. IEEE Std 1453-2015 – *IEEE Recommended Practice – Power Quality – Flicker Measurements*.
7. IEEE Std 1031-2011 – *Guide for Application of STATCOM for Power System Stability*.
8. H. Akagi, *New Trends in Active Filters*, IEEE Trans. Industry Applications, 1996.
9. Z. Chen, F. Blaabjerg, "Voltage-source converter control in power systems," *IEEE Trans. PE*, 2006.
10. IEEE Std 1676-2008 – *Guide for control of HVDC and FACTS Devices*.

ФОРМУВАННЯ СТРАТЕГІЇ ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ ПРОМИСЛОВОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ НА ОСНОВІ МОДЕЛІ ПІДВИЩЕННЯ СТАЛОСТІ ВИРОБНИЧИХ СИСТЕМ

Промислове теплопостачання залишається одним із найменш трансформованих напрямів енергетичної інфраструктури. У більшості підприємств системи опалення функціонують із застарілим обладнанням, недостатнім рівнем автоматизації та низькою гнучкістю управління тепловими потоками. Аналіз наукових публікацій [1–3] свідчить, що питання підвищення енергоефективності промислових систем розглядаються переважно на рівні окремих технічних або організаційних рішень, тоді як цілісна методологія послідовного переходу до низьковуглецевого теплопостачання розроблена недостатньо.

У стратегічних документах Європейського Союзу: European Green Deal, Fit for 55 та REPowerEU [4, 5] визначено, що системи теплопостачання мають стати одним із ключових напрямів декарбонізації. Проте на практиці в більшості країн, зокрема й в Україні, перехід до «чистої» енергії часто обмежується встановленням відновлюваних джерел без попереднього етапу оптимізації споживання. Такий підхід не дає стійкого ефекту, оскільки нові джерела лише частково компенсують втрати, спричинені нераціональним використанням енергії.

Мета роботи – розробити узагальнену структуру стратегії декарбонізації промислових систем теплопостачання, що забезпечує логічну послідовність дій від енергетичної оптимізації до впровадження відновлюваних джерел.

Перехід промислового теплопостачання до низьковуглецевого формату передбачає послідовну реалізацію трьох етапів: оптимізацію енергоспоживання, впровадження сталих технологій та перехід до відновлюваних і низьковуглецевих джерел енергії. Такий підхід дозволяє узгодити етапи модернізації за пріоритетністю, мінімізувати нецільове використання ресурсів і сформувану логічну структуру дій, орієнтовану на довгострокове скорочення викидів. Рисунок 1 ілюструє узагальнену трирівневу архітектуру переходу.



Рисунок 1 – Алгоритм переходу від енергоефективності до декарбонізації промислового теплопостачання

Для вирішення поставленої задачі розроблено структурно-логічну модель підвищення сталості виробничих систем [6], яка адаптована до потреб промислового теплопостачання. Модель поєднує множину об'єктів (ділянки генерації, транспортування та споживання тепла) і множину прийомів (способи підвищення ефективності, технологічної модернізації та

декарбонізації). Їх поєднання дозволяє формалізувати всі можливі напрями дій і створити системну основу для подальшого структурування даних. На основі моделі сформовано узагальнену стратегію декарбонізації промислових систем теплопостачання:

Етап 1. Оптимізація енергоспоживання: оцінюються теплові баланси, режими роботи та втрати, впроваджуються швидкі й економічно доцільні заходи для зменшення попиту на енергію.

Етап 2. Впровадження сталих технологій: модернізується споживання тепла через використання залишкового тепла, локалізацію опалювальних зон, акумулювання, фазозмінні матеріали та інше.

Етап 3. Декарбонізація генерації: залишковий попит покривається відновлюваними та низьковуглецевими джерелами.

Запропонована стратегія дозволяє використовувати її як основу для подальшого розвитку цифрових інструментів енергетичного аналізу. На її базі може бути сформовано довідковий масив прикладних рішень, який надалі стане ядром інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень у сфері декарбонізації промислового теплопостачання.

Висновки. Розроблено системний підхід до формування стратегії декарбонізації промислового теплопостачання, який поєднує етапи енергоефективності, сталих технологій і низьковуглецевої генерації, дозволяє структурно оцінювати процеси генерації, транспортування та споживання тепла, визначати взаємозв'язки між об'єктами й прийомами підвищення ефективності та формує основу для створення цифрових інструментів підтримки прийняття рішень у сфері енергетичної модернізації.

Список використаної літератури

1. Naumann M., Ostermann M., Buchenau N., Schlosser F., Oetzel J., Tröster T., Meschede H. Energy efficiency improvement for decarbonization in manufacturing industry: A review. *Energy Conversion and Management*. 2025. Vol. 312. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2025.119763>
2. Tanaka K. Review of policies and measures for energy efficiency in industry sector. *Energy Policy*. 2011. Vol. 39. P. 6532–6550. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.07.058>
3. Hasanbeigi A., Price L. A review of energy use and energy efficiency technologies for the textile industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012. Vol. 16. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.029>
4. European Commission, Annual Report on European SMEs 2019/2020 (2020). https://single-market-economy.ec.europa.eu/publications/annual-report-european-smes-20192020_en
5. International Energy Agency (IEA), Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector (2021). <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>
6. Біловол Г.В., Каграманян А.О., Василенко О.В., Онищенко А.В. Розроблення моделі повної множини способів підвищення енергетичної ефективності виробничих систем як інструменту досягнення бізнесом цілей сталого розвитку, Збірник наукових праць УкрДУЗТ, No. 2 (2024). <https://doi.org/10.18664/1994-7852.210.2024.320702>

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГОСИЛОВИХ ПАРАМЕТРІВ ГІДРАВЛІЧНОГО ПРИВОДУ ТЮБІНГУКЛАДАЧА

Анотація. Робота присвячена дослідженню процесу функціонування гідроциліндра двосторонньої дії тюбінгоукладчика за допомогою використання імітаційної моделі програмного забезпечення Matlab Simulink.

Ключові слова: прохідницький щит, тюбінгоукладчик, гідроциліндр.

Annotation. The work is devoted to studying the functioning of a double-acting hydraulic cylinder of a tubing layer using a simulation model of Matlab Simulink software.

Keywords: tunnelling shield, tubing layer, hydraulic cylinder.

Вступ. Тунелепрохідницький комплекс є тією захисною конструкцією, що використовується для механізованого руйнування вибою та зведенням кріплень, додатково маючи відношення до механізованих прохідницьких щитів.

Використання сучасних тунелепрохідницьких щитів обумовлене будівництвом тунелів метрополітену чи підземних залізничних та автомобільних шляхів. Фундаментом кожного такого щита є корпус з щитовими домкратами та гідравлічними комунікаціями. Форма поперечного перерізу є круглою, однак зустрічаються й прямокутні, еліптичні та склепінчасті [1].

Укладач тюбінгів є тим оснащенням тунелепрохідницьких щитових, що відноситься до одних з найскладніших гірничих машин, які поєднують в собі механічні та гідравлічні процеси. За їх допомогою здійснюється укладання збірних елементів тунельного облицювання підземних виробок. При застосуванні традиційних методів проектування, параметри укладача при різних діаметрах проходки тунелів змінюються, що призводить до великої кількості трудомістких розрахунків [2].

В проведених дослідженнях розглядалась імітаційна модель гідроприводу двосторонньої дії тюбінгоукладача прохідницького щита WIRTH TB 576.

Мета та завдання досліджень. Дослідження енергосилових параметрів гідравлічного приводу тюбінгоукладача прохідницького щита WIRTH TB 576 з подальшою оцінкою енергоефективності на основі запропонованих та використаних технічних рішень.

Матеріал та результати досліджень.

Принцип роботи тюбінгоукладчика полягає в послідовному транспортуванні, позиціонуванні та монтажу тюбінгових блоків у тунельній оболонці. Сегменти оболонки доставляються на приводний пристрій, який забезпечує їх поступальне переміщення до зони монтажу з кроком, що відповідає довжині одного кільця (номінально 1200 мм) [3]. Основним робочим органом є поворотна консольна конструкція зі змонтованою на ній захватною головою, яка здійснює радіальне переміщення в межах 200° та осьове переміщення вздовж тунелю за допомогою гідроциліндрів. Захоплення тюбінга відбувається спеціальними вилами з гідравлічним замковим механізмом, після чого система гідроциліндрів забезпечує просторове орієнтування блоку через функції вирівнювання, нахилу та осьового коригування положення. Для точного позиціонування використовується вбудований лазерний промінь, що дозволяє оператору суміщати центральну мітку вил з координатною сіткою на тюбінгу перед остаточною установкою. Система гідравлічного живлення та електропостачання реалізована через шлангові барабани з передавальним числом 2:1, які забезпечують безперервну подачу енергоносіїв до робочих органів під час обертання укладчика. Управління всіма функціями здійснюється з підвісного пульта, що дозволяє оператору переміщуватися в робочій зоні та контролювати процес монтажу безпосередньо біля місця установки блоків.

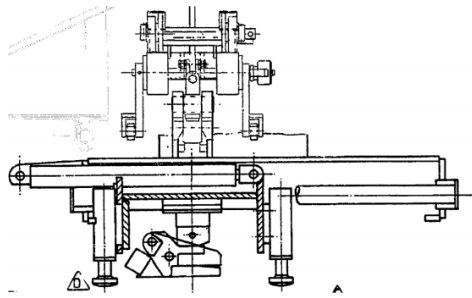


Рисунок 1.1 – Конструкція тюбінгоукладчика

Гідроцилінр двосторонньої дії призначений для розмикання та замикання засувки вилки, що дозволяє зменшувати зношення деталей головок укладчика, у підсумку зменшивши експлуатаційні витрати даного агрегату [4].

На основі технічних характеристик розрахованого гідроциліндра (табл. 1.1) та імітаційної моделі (рис. 1.2), було визначено параметри такої гідравлічної системи як тиск в гідроциліндрі (рис. 1.4) та переміщення поршня (рис. 1.5).

Таблиця 1.1 – Основні технічні характеристики гідравлічного циліндра двосторонньої дії

Технічні параметри	Значення параметра
Тиск насоса укладчика блоків, МПа	17,5
Зусилля на шток, Н	23250
Діаметр поршня, м	0,032
Діаметр штока, м	0,028
Довжина першого плеча, м	0,085
Довжина другого плеча, м	0,145

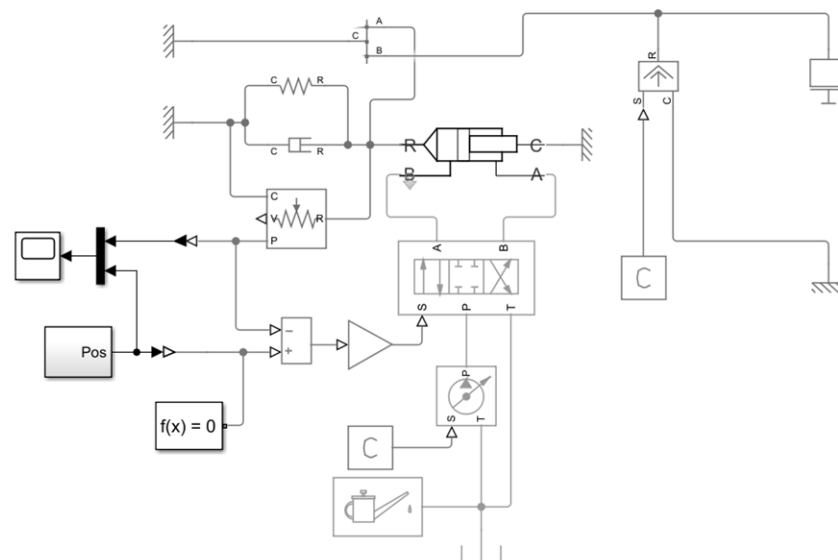


Рисунок 1.2 – Структурна схема імітаційної моделі гідравлічного циліндра подвійної дії

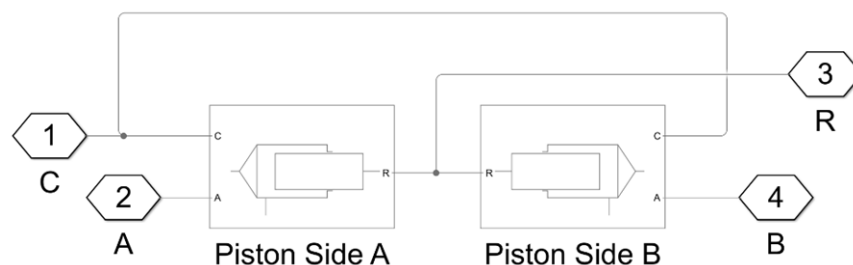


Рисунок 1.3 – Підсистема гідравлічного циліндра

Сторона поршня А гідроциліндру обчислюється за формулою:

$$S_A = S_{\text{порш}} = \frac{\pi \cdot D}{4} = \frac{\pi \cdot 0,032}{4} = 0,0251 \text{ м}^2, \quad (1.1)$$

де D – діаметр поршня, м.

Сторона поршня В гідроциліндру обчислюється за формулою:

$$S_B = S_A - S_{\text{шт}} = S_A - \left(\frac{\pi \cdot d}{4} \right) = 0,0251 - \left(\frac{\pi \cdot 0,028}{4} \right) = 3,142 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 \quad (1.2)$$

де d – діаметр штока, м.

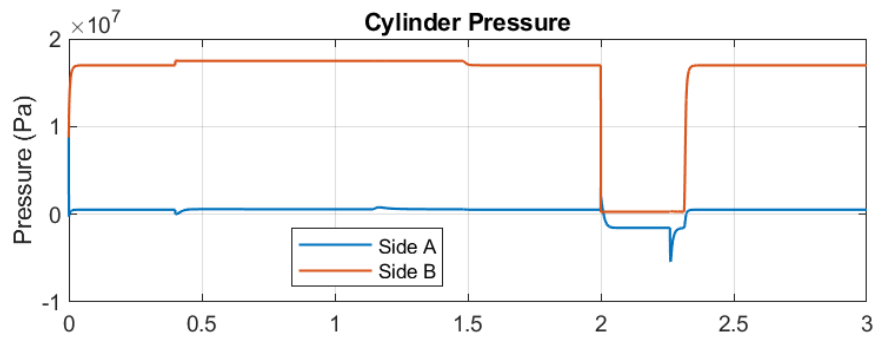


Рисунок 1.4 – Результат моделювання тиску у циліндрі

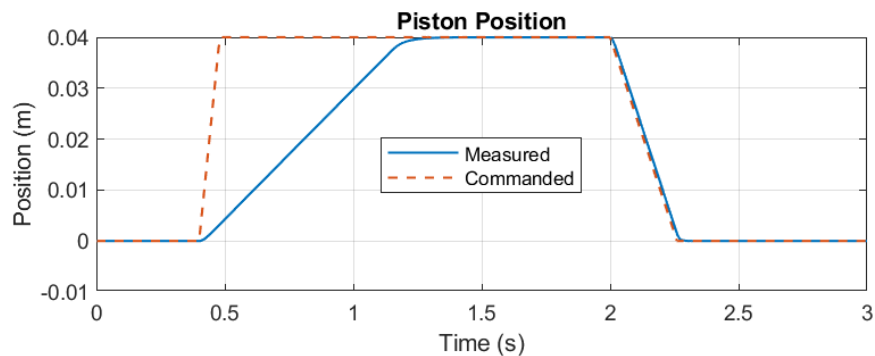


Рисунок 1.5 – Результат моделювання положення поршня

У підсумку, в гідравлічній системі виникає різкий удар тиску через відсутність поступових коливань. Оскільки це є однозначним негативним явищем, необхідно задати такий закон руху, який би унеможливував цю ситуацію. Тобто, поставити додаткові для того, щоб обрати один спосіб чи одну функцію керування.

Математичний вираз, що дає кількісну оцінку ступеню виконання вимог, накладених на спосіб керування, називається критерієм оптимізації [5]. Спосіб керування, який задовольняє поставлені вимоги найкраще, тобто перетворює критерій оптимізації у екстремум, називається оптимальним керуванням.

Критерій оцінювання кулачкових механізмів формулюється у вигляді інтегрального функціоналу, оскільки режими їх роботи описуються функціональними залежностями кінематичних параметрів веденої ланки (переміщення, швидкості, прискорення) від часових або просторових характеристик ведучої ланки впродовж повного робочого циклу. Порівняльний аналіз альтернативних режимів руху вимагає, щоб критерій представлявся скалярною величиною, яка набуває конкретного числового значення для кожного досліджуваного режиму, що забезпечує можливість їх кількісного співставлення.

Усім перерахованим вимогам до критеріїв оцінки режимів руху кулачкових механізмів відповідає структура критерію у вигляді дії [6]:

$$I_n = \int_{t_0}^{t_1} F_n(t, x, \dot{x}, \dots, x^{(n)}) dt, \quad (1.3)$$

де t – час;
 t_0, t_1 – початковий та кінцевий моменти часу закінченого циклу руху;
 F_n – «енергія» прискорень $n - 1$ -го порядку кулачкового механізму;
 $x, \dot{x}, \dots, x^{(n)}$ – координати вихідної ланки кулачкового механізму та їхні похідні включно до n -го порядку.

Висновки.

При виконанні цього дослідження було використано імітаційну модель гідроциліндра двосторонньої дії, в якій було задано параметри тюбінгоукладчика прохідницького щита WIRTH TB576. Встановлено те, що при ступінчастому керуючому сигналі виникають ударні навантаження через різкий ріст тиску в системі й для відповідного усунення необхідно реалізувати плавні закони руху з нульовою третьою похідною.

Застосування оптимальних законів руху та подальше впровадження ПІД-регулятора дозволить отримати енергоефективну роботу гідроприводу для забезпечення плавного руху вихідного сигналу.

Список використаних джерел

1. Прохідницький щит – Вікіпедія. – Заголовок з екрана. – Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Прохідницький_щит
2. Обґрунтування методу проектування пристроїв тунельного укладача / Заболотний К. С., Панченко О. В., Жупієв О. Л. // Перспективи розвитку науки, освіти і технологій в контексті євроінтеграції: збірник тез доповідей міжнародної науково-практичної конференції, 12 жовтня 2022 р. м. Кропивницький. – Кропивницький: ЦФЕНД, 2022. – 52-54
3. М. Є. Гібшман, В. І. Попов Проектування транспортних споруд. 2 вид. Москва: Транспорт, 1988. 286 с.
4. Шестак Д. Є. Модернізація конструкції тюбінгоукладчика прохідницького щита WIRTH TB 576, шляхом зміни та проектування демфера гідроциліндра. «Енергетика. Екологія. Людина» Збірник наукових праць XV науково-технічної конференції 16-18 травня 2023 р. – Київ, НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»
5. Аналіз та синтез режимів руху механізмів вантажопідйомних машин. Монографія / В.С. Ловейкін, Ю.О. Ромасевич. – К.: ЦП «КОМПРІНТ», 2012. – 298 с
6. Динамічна оптимізація кулачкового приводу машин роликового формування. Монографія. – К.: ЦП «Компринт», 2016. – 177 с.

ІНТЕГРАЦІЯ МЕТОДІВ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ ВДОСКОНАЛЕННЯ ЧИСЕЛЬНО-АНАЛІТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ РОЗРАХУНКУ ВЛАСНИХ ЧАСТОТ КОЛИВАНЬ КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПАРОВИХ ТУРБІН

Вступ

Конструктивні елементи парових турбін зазнають впливу дії широкого діапазону інтенсивних механічних (статичних і динамічних) та термічних навантажень під час експлуатації в умовах високих температур і корозійно-агресивного середовища [1]. У процесі тривалої експлуатації це призводить до поступового накопичення втомних пошкоджень у конструктивних елементах — робочих лопатках, роторах, дисках, муфтах і валах. Такі дефекти призводять до змін механічної жорсткості і масових характеристик, що проявляється у змінах власних частот і форм коливань.

У роботі [2] показано, що точність визначення власних частот істотно залежить від геометричних параметрів, глибини тріщини, умов заземлення та фізико-механічних властивостей матеріалу.

Розроблені чисельно-аналітичні моделі дозволили отримати високий рівень відповідності між експериментальними та розрахунковими даними [2], однак подальше підвищення точності потребує врахування нелінійностей і невизначеностей, які складно формалізувати аналітичними методами.

Одним із перспективних напрямків розвитку методів вібраційної діагностики є інтеграція технологій штучного інтелекту *AI (Artificial Intelligence)* з існуючими чисельно-аналітичними моделями, що дозволить підвищити їхню адаптивність, точність і прогностичні можливості [3].

Мета і завдання дослідження

Актуальним є завдання розроблення підходу до інтеграції методів штучного інтелекту в існуючі чисельно-аналітичні моделі розрахунку власних частот і форм коливань конструктивних елементів парових турбін з метою підвищення ефективності вібраційної діагностики пошкоджень.

В роботі [2] створено математичні моделі для чисельно-аналітичного визначення власних частот коливань турбінних лопаток і роторів, у тому числі з урахуванням наявності тріщин різної глибини та місцеположення.

Мета цього дослідження полягає у розробленні гібридної моделі, яка поєднує класичні рівняння коливань з коригувальними залежностями, ідентифікованими методами машинного навчання *ML (Machine Learning)* на основі експериментальних вібраційних даних для підвищення точності визначення власних частот та форм коливань і чутливості до пошкоджень конструктивних елементів парових турбін.

МЕТОДИКА ІНТЕГРАЦІЇ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ У ЧИСЕЛЬНО-АНАЛІТИЧНУ МОДЕЛЬ ФОРМУВАННЯ БАЗИ ДАНИХ ДЛЯ НАВЧАННЯ AI-МОДЕЛЕЙ:

База даних містить:

- розраховані власні частоти для різних варіантів дефектів (за результатами моделей, наведених у [2]);
- експериментальні частоти, отримані під час натурних випробувань та використання діагностичних систем;

- параметри геометрії, матеріалу, глибини тріщини, температури та інші фактори, що впливають на динамічну поведінку елемента.

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ:

Для інтеграції AI використовуються різні класи моделей:

- регресійні моделі *RF (Random Forest)* та *GB (Gradient Boosting)* для апроксимації залежностей між параметрами пошкодження та змінами власних частот;
- нейронні мережі *MLP (Multilayer Perceptron)* і *CNN (Convolutional Neural Network)* для аналізу спектрів вібрацій і класифікації типів дефектів;
- автоенкодера та рекурентні мережі *LSTM (Long Short-Term Memory)* для виявлення аномалій і прогнозування розвитку тріщин у часі.

КОРЕКЦІЯ ЧИСЕЛЬНО-АНАЛІТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ: AI-модель обчислює коригувальні коефіцієнти до параметрів жорсткості та модальних мас, що забезпечує адаптацію базової чисельно-аналітичної моделі до фактичного технічного стану елемента на основі вібраційних даних.

ВАЛІДАЦІЯ: Оновлені значення власних частот і форм коливань порівнюються з результатами експериментів. Допустима похибка не повинна перевищувати 2–3 %, що відповідає рівню достовірності, встановленому в роботі [2].

За умови підтвердження точності моделі очікується, що вона дозволить оцінювати власні частоти коливань з високою достовірністю, забезпечуючи можливість ідентифікації мікропошкоджень за зміною спектральних характеристик без використання складних обернених розрахунків. Це також створює передумови для переходу від ручного аналізу вібраційних сигналів до автоматизованого розпізнавання дефектів та формує основу для створення інтелектуальної системи технічного моніторингу парових турбін, із здатністю до самонавчання.

Висновки

Інтеграція методів штучного інтелекту у чисельно-аналітичні моделі дозволить автоматизувати обробку вібраційних даних, отриманих під час експлуатації турбін, скоротити час та трудомісткість аналізу, своєчасно виявляти початкові стадії дефектів у критичних елементах і створить основу для побудови цифрового двійника (*Digital Twin*) турбіни, який у реальному часі поєднує моделювання та вимірювання.

Застосування методів штучного інтелекту дозволить підвищити адаптивність і точність чисельно-аналітичних моделей, забезпечуючи новий рівень вібраційної діагностики. Отримані результати відкриють можливість створення інтегрованої системи *Smart Vibration Diagnostics*, орієнтованої на прогнозування технічного стану турбінного обладнання.

У подальших дослідженнях передбачається розроблення програмного комплексу на мові *Java* в інтегрованому середовищі розробки *IntelliJ IDEA* з включенням модуля штучного інтелекту для аналізу вібраційних даних та адаптації чисельно-аналітичних моделей.

Список використаної літератури

1. Бовсуновський О.А., Носаль О.Ю. «Діагностика пошкодження роторів турбін на стадії ремонту». Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. Енергетика. Том 35 (74), № 4, 2024, С. 238–245. DOI:10.32782/2663-5941/2024.4/35.
2. Носаль, О. Ю. Вібродіагностика пошкоджень конструктивних елементів парової турбіни при її експлуатації і ремонті: дисертація доктора філософії: 144 Теплоенергетика / Носаль Олександр Юрійович. – Київ, 2025. – 238 с. Взято 11.11.2025 з <https://ela.kpi.ua/items/9e02c567-056b-4b42-bd579c05b040cf22>.
3. Nosal O.Yu., Nosal V.Yu. «Analytical review of sphere of use of programs based on artificial intelligence»

GLOBALIZATION PROCESSES AND THE TRANSFORMATION OF SCIENCE, EDUCATION, AND SOCIETY:

AN INTERDISCIPLINARY DISCOURSE. INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND PRACTICAL CONFERENCE, (P.203-207), Boston, USA, October 14, 2025 – ISBN: 978-1-968285-95-1.

ІНТЕГРАЦІЯ ФОТОВОЛЬТАІЧНИХ ПАНЕЛЕЙ ТА СИСТЕМ ГЕНЕРУВАННЯ ВОДНЮ В АВТОМАТИЗОВАНИХ АВТОНОМНИХ СИСТЕМАХ ГЕНЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРИКИ

Вступ. Сучасний етап розвитку цивілізації характеризується зростанням потреб в енергоресурсах та одночасним вичерпанням традиційних видів палива. Використання вугілля, нафти й природного газу, що залишаються основою енергетики, спричиняє значні екологічні загрози, викиди парникових газів і посилення глобальних кліматичних змін. За оцінками, запаси нафти можуть вичерпатися до 2050-х років, а природного газу – до 2060-го [11]. Натомість енергія Сонця та Водню має тривалий потенціал: фотоелектричні панелі зберігають ефективність понад 80–90% навіть через 20–30 років експлуатації [12], а виробництво Водню забезпечує понад тридцять років стабільного використання [11]. У цих умовах особливої актуальності набуває розвиток автономних систем, здатних забезпечувати стабільне електропостачання незалежно від централізованих мереж.

Виклад основного матеріалу. Сонячна енергетика стрімко розвивається завдяки сучасним технологіям, що підвищують ефективність і знижують собівартість виробництва енергії. Її основні переваги – невичерпність джерела, доступність на більшій частині території Землі та можливість безпосереднього перетворення сонячного випромінювання на електричну чи теплову енергію [5]. Нині виокремлюють два основні напрями використання сонячної енергії:

- **Фотоелектричні технології** – перетворюють сонячне випромінювання безпосередньо в електричну енергію;
- **Термодинамічні технології** – акумулюють теплову енергію Сонця, яку потім перетворюють на механічну та електричну енергію через термодинамічний цикл [8].

Термодинамічні системи використовують високотемпературну теплову енергію (538–1482 °C) [4], тому потребують фокусуючих поверхонь і складного технологічного циклу, подібного до традиційних електростанцій. Проте через залежність від прямої сонячної радіації та сезонні коливання їх ефективність у наших широтах невисока, тому перевага надається фотовольтаїчним технологіям [5; 10; 8; 9]. Фотоелектричні елементи працюють завдяки фотогальванічному ефекту – виникненню електричного струму при поглинанні світла р-п матеріалом [10]. Найпоширеніші сонячні модулі – плоскі, статичні, іноді з трекінговими системами [12]. Основні типи фотоелектричних елементів: монокристалічні, полікристалічні та тонкоплівкові, які різняться ефективністю, технологією виготовлення та вартістю [2].

Сонячні енергетичні системи перетворюють сонячну радіацію в електричну чи теплову енергію та поділяються на активні й пасивні [10; 12].

Активні системи використовують спеціальні пристрої для приймання, накопичення та перетворення енергії, забезпечуючи високий рівень контролю й стабільності [10].

Пасивні системи ґрунтуються на раціональному використанні теплоізоляційних матеріалів і архітектурних рішень, що дозволяють спорудам самостійно акумулювати тепло й знижувати енергоспоживання [10; 12]. Обидва підходи взаємодоповнюють один одного, сприяючи підвищенню енергоефективності будівель.

Акумулювання енергії в сонячних системах
Ефективність сонячних технологій залежить від можливості зберігати вироблену енергію, оскільки генерація відбувається лише за наявності сонячного випромінювання. Тому ключовим завданням є впровадження систем накопичення для безперервного електропостачання.

Основні методи акумулювання:

- **Батарейні системи** – насамперед літій-іонні, що мають високу енергетичну щільність і дозволяють підвищити рівень самоспоживання з 30 % до понад 60 %, однак відзначаються високою вартістю й обмеженим терміном служби [12].

- **Гідроакумулюючі станції** – забезпечують масштабне та тривале зберігання енергії, підвищуючи гнучкість інтеграції сонячних систем у мережу [12].

- **Теплові сховища** (зокрема на розплавлених солях) – дають змогу зберігати енергію для роботи в нічний час із коефіцієнтом використання до 45 % [12].

- **Інноваційні технології** – водневі сховища та ванадієві редокс-акумулятори (VRFB), що досягають ефективності 80–90 % і придатні для довготривалого або сезонного зберігання [6].

Отже, сучасні системи акумулювання мають різні переваги, проте виклики вартості, довговічності й екологічності залишаються ключовими, стимулюючи розвиток водневих технологій.

Воднева енергетика. Водень (H_2) є перспективним енергоносієм для секторів, де скорочення викидів особливо складне (металургія, транспорт, хімічна промисловість). Його теплота згоряння – 142 МДж/кг, а єдиним продуктом реакції є вода, що робить його екологічно чистим паливом [6; 7; 9]. Водень – ключовий елемент «Європейського зеленого курсу»; в Україні реалізуються проєкти з виробництва «зеленого» водню на базі сонячної та вітрової енергії [12].

Основні способи виробництва:

- **Паровий риформінг метану (SMR)** – найпоширеніший метод із виходом 75–85 %, але супроводжується значними викидами CO_2 і високими енерговитратами [1; 12; 8].
- **Електроліз води** – екологічно чиста технологія, що використовує відновлювану енергію; є базовим способом виробництва «зеленого» водню [3; 6; 7; 12].
- **Біотехнологічні методи** – поки на стадії досліджень [6].

Використання водню. Близько 75 млн тонн водню щороку застосовується переважно в нафтохімії та виробництві добрив (гідроочищення, аміак) [5; 12]. Також використовується у металургії, енергетиці та машинобудуванні як охолоджувальне та захисне середовище [5; 10].

Зберігання. Водень зберігають у стисненому (до 700 атм), зрідженому ($-253\text{ }^{\circ}C$) або гідридному стані. Розвиваються паливні елементи, що перетворюють енергію водню в електричну з ККД до 55 %, застосовуються у транспорті та автономних системах [3].

Інтеграція з сонячною енергетикою. Поєднання фотогальванічних систем з електролізерами дозволяє використовувати надлишкову сонячну генерацію для виробництва й зберігання водню, забезпечуючи автономність і стабільність енергопостачання [2; 10].

Висновок. Інтеграція фотовольтаїчних панелей із системами генерації та зберігання водню забезпечує стабільне й автономне електропостачання, зменшує залежність від мереж і підвищує ефективність використання сонячної енергії. Водень виступає екологічним енергоносієм і надійним засобом довготривалого зберігання енергії. Такі рішення сприяють розвитку «зеленої» енергетики та переходу до сталого енергетичного майбутнього.

Список використаних джерел

- 1.Абракітов В. Е., Барбашин В. В. Методичні вказівки до виконання глави «Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях». Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2023. 16 с.
- 2.Бенменні М. Особливості проєктування фотоелектричних станцій, що розміщуються на дахах та стінах будівель. Відновлювана енергетика. 2017. № 3 (50). С. 41–47.
- 3.Бойченко С. Ю., Шкільнюк І. О., Целіщев О. Б., Матвіїв І. В., Тарасюк О. В., Яворські А., Вос П. Сучасні технології генерування та акумуляції водню: аналітичний огляд теоретичного та практичного досвіду. Енергетика: економіка, технології, екологія. 2022. № 1. С. 7–21. DOI: 10.20535/1813-5420.1.2022.259125.
- 4.Відновлювані джерела енергії : монографія / за ред. С. О. Кудрі. 2-ге вид., допов. Київ : Ін-т відновлюваної енергетики НАН України, 2024. 492 с.
- 5.Карп І. М. Водень: властивості, виробництво та особливості використання. Енерготехнології та ресурсозбереження. 2020. № 2. С. 3–12.

6.Кочубей О. В., Душечкіна Н. Ю. Аналіз методів отримання водню. Proceedings of the 1st International Scientific and Practical Conference «From Ideas to Solutions: Innovations in Science and Technology» (17–19 February 2025, London, United Kingdom). European Open Science Space, 2025. С. 137–144.

7.Погосов О., Чепурна Н. Перспективи та проблематика використання водню як системи акумуляції позабалансної генерації електричної енергії для нафтогазового та енергетичного секторів України. Scientific Collection «InterConf». 2024. № 187. С. 314–321.

8.Разінков В. О. Методи та засоби підвищення коефіцієнту корисної дії сонячних фотоелектричних панелей : дис. ... д-ра філософії : 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. Одеса : Нац. ун-т «Одеська політехніка», 2025. 161 с.

9.American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers. ASHRAE Handbook: Fundamentals. Atlanta, GA : ASHRAE, 2001.

10. Denysiuk S. Guidelines of technological concepts of Smart Grid in power system. Power Engineering: Economics, Technique, Ecology. 2014. Vol. 1 (31). P. 7–20.

11. Fossil Fuels Run [Електронний ресурс]. Millennium Alliance for Humanity and the Biosphere (MAHB). URL: <https://mahb.stanford.edu/library-item/fossil-fuels-run/>.

12. Schubert T. F. Jr., Kim E. M. Fundamentals of electronics: Book 2. Synthesis Lectures on Digital Circuits and Systems. 2015. Vol. 10, No. 2. P. 1–366.

РОЗБУДОВА ТА РЕКОНСТРУКЦІЯ РОЗПОДІЛЬНОЇ ТА НИЗЬКОВОЛЬТНОЇ МЕРЕЖІ У КИЇВСЬКІЙ ОБЛАСТІ

Вступ. Актуальність теми зумовлена синергією кількох критичних факторів. По-перше, це досягнення граничного рівня фізичного зносу значної частини мережевих активів, що на пряму загрожує безпеці та стабільності електропостачання столичного регіону. По-друге, це стале зростання енергоспоживання, зумовлене як економічним розвитком, так і урбанізаційними процесами, що створює дефіцит пропускної спроможності існуючої інфраструктури. По-третє, це безпрецедентні виклики, пов'язані з масштабними пошкодженнями енергетичних об'єктів внаслідок повномасштабної збройної агресії, що вимагає не просто відновлення, а відбудови на нових, більш стійких та ефективних технологічних засадах. Нарешті, необхідність підвищення енергоефективності, надійності та інтеграції відновлюваних джерел енергії відповідно до стратегічного курсу України на інтеграцію з європейським енергетичним простором висуває нові, жорсткіші вимоги до розподільних мереж, яким існуюча архітектура 10 кВ вже не може повною мірою відповідати.

Оцінка стану мереж. Розподільні електричні мережі Київської області, як і більшість мереж в Україні, характеризуються високим рівнем фізичного та морального зносу. Ця проблема є системною і накопичувалася протягом десятиліть через хронічне недофінансування галузі. Згідно з офіційними оцінками, представленими на рівні НКРЕКП, середній залишковий строк експлуатації для електричних мереж розподільчих компаній становить орієнтовно 10-11 років.[1] Цей показник є критичним і свідчить про те, що значна частина обладнання (опори, проводи, трансформатори, комутаційна апаратура) вже вичерпала свій нормативний ресурс або наближається до цієї межі. Експлуатація такого обладнання призводить до зростання аварійності, збільшення технологічних втрат електроенергії та підвищення операційних витрат на підтримання його в робочому стані.

Згідно з прогностичними оцінками, ця тенденція збережеться і в середньостроковій перспективі. Зокрема, ДТЕК прогнозує, що споживання електроенергії в Києві, яке тісно корелює з динамікою в області, зросте на 9% протягом наступних п'яти років, досягнувши 11,3 млрд кВт-год [2], [3]. Таке зростання створює додатковий тиск на вже зношену та часто перевантажену мережеву інфраструктуру.

Особливої гостроти набуває проблема щільності навантаження. Це явище виникає в зонах інтенсивної нової забудови (великі житлові комплекси, котеджні містечка) або при створенні нових промислових чи логістичних об'єктів. На відносно невеликій території концентрується значне електричне навантаження, яке суттєво перевищує проектну пропускну здатність існуючих ліній 10 кВ та потужність найближчих центрів живлення. В таких умовах існуюча мережа 10 кВ стає "вузьким місцем", яке фізично не може забезпечити приєднання нових потужностей або надійне живлення існуючих споживачів.

Це перетворює зростання навантаження з простої загрози на потужний каталізатор для технологічних змін. Для покриття зростаючого попиту в рамках архітектури 10 кВ необхідно прокладати численні нові кабельні та повітряні лінії, будувати нові РП та ТП, що є надзвичайно капіталомістким, а в умовах щільної міської забудови – часто й технічно неможливим через брак коридорів для комунікацій. Саме в таких умовах перехід на вищий клас напруги 20 кВ перестає бути "бажаним" оновленням і перетворюється на економічно та технічно обґрунтовану необхідність, оскільки дозволяє передати вдвічі більшу потужність по існуючих трасах (з відповідною заміною обладнання), що є значно ефективнішим рішенням для зон з високою щільністю навантаження. [4]

Таблиця 1. Порівняння мереж 10кВ та 20кВ

Показник	Мережа 10 кВ (V)	Мережа 20 кВ (2V)	Пояснення (при $P = const$)
Струм в лінії (для тієї ж P)	$I = P/V$	$I/2 = P/(2V)$	В 2 рази нижчий
Втрати потужності ($P_{loss} = I^2 2R$)	P_{loss}	$P_{loss}/4 = (I/2)^2 R$	В 4 рази нижчі
Пропускна здатність (при тому ж I_{max})	$P_{max} = VI_{max}$	$2 \times P_{max} = (2V)I_{max}$	В 2 рази вища
Дальність передачі (при тій самій P_{loss})	L	$4L$	В 4 рази більша
Вартість обладнання	Базова	Вища	Вищі вимоги до ізоляції
Габарити (ізолятори, відстані)	Менші	Більші	Вищі вимоги до безпеки

Структура та джерела фінансування Інвестиційної програми

Практичним інструментом реалізації інвестиційної політики ОСР в рамках РAB-регулювання є щорічна Інвестиційна програма, яка розробляється компанією та схвалюється НКРЕКП. Цей документ детально описує всі заплановані заходи з нового будівництва, реконструкції та модернізації мереж, а також визначає джерела їх фінансування.

Для прикладу, Постановою НКРЕКП № 2396 від 30.12.2024 було схвалено Інвестиційну програму ПРАТ "ДТЕК Київські регіональні електромережі" на 2025 рік. Загальна сума запланованих інвестицій становить 908 312 тис. грн (без урахування ПДВ).[5]

Висновок

На основі проведеного аналізу техніко-економічних передумов, порівняння переваг та вивчення міжнародного і вітчизняного досвіду зроблено висновок, що єдиним стратегічним рішенням, здатним комплексно вирішити накопичені проблеми та забезпечити перспективний, надійний та ефективний розвиток енергосистеми Київського регіону, є поступовий, але системний перехід з класу напруги 10 кВ на 20 кВ.

Реальний стан переходу мережі на 20кВ в київській області можна оцінити як не розпочатий взагалі. Можливо існують пілотні, пробні проекти в області. Але ОСР замовляє проекти для включення споживачів за стандартним і нестандартним приєднанням не передбачаючи потреб в арматурі для можливого переходу на 20кВ. Максимум дозволеної реконструкції це мережі 10кВ.

Можливо при збільшенні фінансування та запровадження державної політики будуть проводитись комплексні інвестиційні програми з розбудови та реконструкція розподільної мережі 20кВ у київській області.

Список використаних літератури

1. Результати наради з питань підвищення енергоефективності роботи електромереж та зменшення втрат в розподільчих мережах 6(10) кВ шляхом переходу на 20 кВ | Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг - НКРЕКП, <https://www.nerc.gov.ua/news/rezultati-naradi-z-pitan-pidvishchennya-energoefektivnosti-roboti-elektromerezh-ta-zmenshennya-vtrat-v-rozpodilchikh-merezhakh-610-kv->
1. shlyakhom-perekhodu-na-20-kv
2. ДТЕК прогнозує ріст споживання Києва у наступні 5 років на 9% - до 11,3 млрд кВт- год, <https://expro.com.ua/novini/dtek-prognozu-rst-spojivannya-kiva-u-nastupn-5-rokv-na-9-do-113-mlrd-kvt-god->
3. Проходження осінньо-зимових періодів 2022-2024 рр. Стан енергосистеми - DiXi Group, <https://dixigroup.org/analytic/prohodzhennya-osinno-zymovih-periodiv-2022-2024-r-stand-energosityemy/>
4. Про схвалення Інвестиційної програми ПРАТ «ДТЕК КИЇВСЬКІ РЕГІОНАЛЬНІ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖІ» на 2025 рік | Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг - НКРЕКП, <https://www.nerc.gov.ua/acts/pro-shvalennya-investicijnoyi-programi-prat-dtek-kiyivski-regionalni-elektromerezh-na-2025-rik>
5. Створення опорної мережі живлення 20 кВ в Україні - Промавтоматика, [https://rza-](https://rza-news/sozdanye-opornoj-pytaiushchej-sety-20-kv-v-u-2/)
6. news/sozdanye-opornoj-pytaiushchej-sety-20-kv-v-u-2/

ОГЛЯД РОЗРОБКИ ТА ТЕСТУВАННЯ ЦИФРОВИХ РІШЕНЬ ДЛЯ МІСЬКИХ РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

Перехід України до енергетики XXI століття вимагає не лише збільшення потужностей генерації, але й фундаментальної трансформації розподільних мереж напругою 0,4-20 кВ. Цей процес чітко відображено у державних стратегічних документах: Енергетична стратегія України до 2050 року [1] передбачає широке застосування інноваційних технологій та цифрової трансформації енергомереж. Концепція впровадження "розумних мереж" (Smart Grid) в Україні до 2035 року (Розпорядження КМУ № 908-р від 14.10.2022) [2] встановлює рамкові принципи, ключові напрямки та інструменти для реалізації цифровізації, особливо в контексті відбудови після руйнувань, спричинених агресією. Стратегія розвитку розподіленої генерації до 2035 року [3] створює фундамент для інтеграції міні-, малих і середніх генераторів, що накладає додаткові вимоги до адаптивності та гнучкого управління мережами.

Визначення ключових цілей цифровізації

Цифровізація міських розподільних мереж є відповіддю на подвійний виклик: технічну застарілість фізично зношеної інфраструктури та стратегічну необхідність інтеграції з європейськими енергетичними ринками [5]. Вибір моделі Smart Grid дозволяє встановити конкретні кількісні цільові показники:

Автоматизація моніторингу та контролю

Основна мета – забезпечення безперервного збору даних (напруга, струм, потужність, температура обладнання) для оперативного виявлення відхилень та ефективного управління. Технологічний базис: Системи SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) є фундаментом для централізованого диспетчерського керування в реальному часі. АСКОЕ (Автоматизовані системи комерційного обліку електроенергії) є ключовим елементом на рівні споживача, дозволяючи дистанційно збирати показання лічильників і досягати високої точності обліку (до 99.2%) [6] [7]. Результат: Перехід від ручного контролю до автоматизованого управління, де зібрані дані слугують основою для аналізу, прогнозування (завдяки моделям машинного навчання) та прийняття рішень [8].

Зниження технічних та комерційних втрат електроенергії

Зниження втрат є однією з найбільш відчутних цілей, що має прямий економічний та значний екологічний ефект. Стратегічний показник: Концепція Smart Grid передбачає амбітне зниження втрат в електромережах із 11.6% до 7.5% до 2035 року, що еквівалентно щорічній економії 6 млрд кВт·год [5]. Механізм: Впровадження АСКОЕ забезпечує точний комерційний облік, дозволяючи виділити та мінімізувати комерційні втрати (зокрема, пов'язані з крадіжками). Деталізовані дані дають змогу перейти до поелементних розрахунків технічних втрат, ідентифікуючи проблемні ділянки мережі для цілеспрямованої модернізації [9].

Підвищення надійності електропостачання

Ключовий критерій – зменшення кількості та тривалості перерв. Це досягається завдяки впровадженню концепції "самовідновлювальних мереж" (Self-Healing Grid) [10]. Принцип роботи: Інтелектуальна система використовує технології виявлення та контролю для автоматичної діагностики та усунення несправностей. При аварії система автоматично ізолює пошкоджену ділянку та відновлює живлення до неушкоджених споживачів за лічені секунди. Кількісний показник: Цільовим показником є скорочення SAIDI (System Average Interruption Duration Index) з 1700 до 100 хвилин до 2035 року, що відповідає середньоєвропейському рівню [5]. Це переводить управління мережею від реактивної до проактивної моделі.

Покращення якості електроенергії

Постійний моніторинг параметрів якості електроенергії відповідає європейським стандартам, зокрема ДСТУ EN 50160:2014 [11], що регулює відхилення напруги (у межах $\pm 10\%$), частоту та рівень гармонічних спотворень ($\text{THD} \leq 8\%$). Це є вирішальним для залучення інвестицій та стимулювання економічної діяльності.

Вибір технологій: Фундамент Smart Grid

Цифрова трансформація вимагає комплексного підходу до вибору масштабованих та безпечних технологій: Інтернет речей (IoT): Інтелектуальні лічильники та датчики (наприклад, релейні) забезпечують збір даних у режимі реального часу, прискорюючи виявлення та ізоляцію несправностей [12]. Хмарні платформи: Надають масштабоване та безпечне середовище для зберігання, обробки та аналізу великих даних, підтримуючи віддалений моніторинг та управління. Підтримують 256-бітне AES-шифрування для захисту даних [13]. Штучний інтелект (AI) та машинне навчання (ML): Перетворюють зібрані дані на корисні інсайти. Застосовуються для прогнозування навантажень, автоматизованого виявлення аномалій (наприклад, крадіжок) та оптимізації роботи мережі, зокрема для управління коливаннями від ВДЕ [14]. Кібербезпека: Необхідна для захисту критичної інфраструктури від загроз, таких як підміна даних чи порушення роботи систем. Застосовуються шифрування (SSL/TLS, VPN), автентифікація (наприклад, Zigbee) та стійка сітчаста (mesh) топологія мережі. Діяльність координує Міненерго [15].

Практична реалізація: Пілотний проєкт ДТЕК "Цифровий двійник"

Руйнування мереж створило унікальну можливість "перестрибнути" через покоління технологій. ОСР України розробила 10-річний проєкт "Мережі Майбутнього" (€2.4 млрд), метою якого є побудова нової, інтелектуальної та стійкої мережі [4] [16]. Пілотна ділянка: Ірпінсько-Бучансько-Бородянський енергетичний вузол [4] [16]. Технологія: Створення "Цифрового двійника" (Digital Twin) – віртуальної копії мережі, яка дозволяє моделювати її роботу, розподіл навантаження та прогнозувати аварії [17]. Джерела даних: Успіх Двійника залежить від інтеграції складного масиву інформації з різних систем: GIS (геопросторові дані), Corporate ERP & Data BI (технічні параметри), Billing (дані клієнтів), AMI/Smart Metering (графіки навантажень у реальному часі) та ADMS (статистика відключень). Стратегічна цінність: Успіх пілотного проєкту в найбільш пошкоджені війною середовищі є переконливим бізнес-обґрунтуванням для залучення значних інвестицій, демонструючи здатність створити надійну мережу.

Висновок

Проєкт "Мережі Майбутнього" та його пілотний етап є критично важливим компонентом ширшої стратегії післявоєнної відбудови України. Побудова сучасної, децентралізованої та стійкої мережі, втілюючи концепцію «відбудувати краще, ніж було», позиціонує Україну як майбутній «великий центр чистої енергії для Європейського Союзу», зміцнюючи її енергетичну безпеку та інтеграцію в європейський ринок [4] [16].

Список використаної літератури

1. Енергетична стратегія України до 2050 року. Міністерство енергетики України. URL: https://www.mev.gov.ua/reforma/enerhetychna-stratehiya-0?utm_source (Дата звернення: [21.10.2025]).
2. Про схвалення Концепції впровадження «розумних мереж» (Smart Grid) в Україні до 2035 року: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 14.10.2022 № 908-р. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/908-2022-p?utm_source (Дата звернення: [21.10.2025]).
3. Про схвалення Стратегії розвитку розподіленої генерації до 2035 року: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 26.07.2024 № 713-р. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/713-2024-p?utm_source (Дата звернення: [21.10.2025]).
4. DTEK plans Kyiv region smart grid. *Smart Energy International*. URL: https://www.smart-energy.com/industry-sectors/smart-grid/ukraines-dtek-plans-kyiv-region-smart-grid/?utm_source (Дата звернення: [21.10.2025]).
5. Уряд схвалив Концепцію впровадження «розумних мереж» в Україні до 2035 року. Міністерство енергетики України. URL: <https://www.mev.gov.ua/novyna/uryad-skhyalyv-kontseptsiyu-vprovadzhennya-rozumnykh-merezh-v-ukrayini-do-2035-roku> (Дата звернення: [21.10.2025]).

6. Sinsmarts. What is a SCADA system and how does it work. URL: <https://www.sinsmarts.com/uk/blog/what-is-a-scada-system-and-how-does-it-work> (Дата звернення: [21.10.2025]).
7. InduSoft. SCADA система: що це таке. URL: <https://indusoft.com.ua/blog/2019/10/29/scada-systema-cho-to-jeto-takoe> (Дата звернення: [21.10.2025]).
8. Праховник А. В., Коцар О. В. Концептуальні положення побудови АСКОЕ в умовах запровадження перспективних моделей енергоринку України. *Енергетика та електрифікація*. 2009. № 2. С. 45–50.
9. Лежнюк П. Д., Кулик В. В., Пашенко А. В. Розрахунок втрат електроенергії в електричних мережах 0,38 кВ з використанням АСКОЕ. Кафедра електричних станцій і систем, ВНТУ, м. Вінниця. [Неопублікований документ].
10. Розбудова Smart Grid – шлях до підвищення стійкості енергосистеми України. *Укрінформ*. URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-economy/3863598-rozbudova-smart-grid-slah-do-pidvisenna-stijkosti-energosisitemi-ukraini.html> (Дата звернення: [21.10.2025]).
11. S&C Electric Company. Self-Healing Grids. URL: <https://www.sandc.com/en/solutions/self-healing-grids> (Дата звернення: [21.10.2025]).
12. Svoya Energy. Використання розумних мереж Smart Grid. URL: <https://svoya-energy.com.ua/vykorystannya-rozumnyh-merezh-smart-grid> (Дата звернення: [21.10.2025]).
13. uCloud. Хмарні рішення 2023–2024. URL: <https://ucloud.ua/hmarni-rishennya-2023-2024> (Дата звернення: [21.10.2025]).
14. USC. Smart Grid. URL: <https://sites.usc.edu/dslab/projects/past-projects/smart-grid> (Дата звернення: [21.10.2025]).
15. Захист енергетичної інфраструктури від кібератак. *Держспецзв'язку*. URL: <https://cip.gov.ua/ua/news/protection-of-energy-infrastructure-from-cyberattacks-has-been-trained-at-the-recent-ssscip-s-tabletop-exercise> (Дата звернення: [21.10.2025]).
16. Ukraine's DTEK planning €2.4 billion smart grid investment in Kyiv region. *Renewable Energy Magazine*. URL: <https://www.renewableenergymagazine.com/miscellaneous/ukrainea-s-dtek-planning-2-4-billion-20230622> (Дата звернення: [21.10.2025]).
17. На Київщині реалізовано пілот цифрового двійника мереж. *DTEK Grids*. URL: <https://grids.dtek.com/media-center/press/na-kiivschini-realizovano-pilot-tsifrovogo-dviynika-merezh--dte> (Дата звернення: [21.10.2025]).

Н. О. Поліщук, магістр,
 наук.керівник – канд.техн.наук, доцент **О. В. Коцар**
 Національний технічний університет України
 «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна

РЕЗЕРВУВАННЯ СИСТЕМ КОМБІНОВАНОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЖИТЛОВИХ КОМПЛЕКСІВ РЕСУРСОМ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ

Вступ. Дослідження фокусуються на використанні акумуляторних батарей електромобілів як мобільних джерел резервного живлення для систем комбінованого електропостачання житлових комплексів. Завдяки технології *Vehicle-to-Grid* (V2G), що забезпечує двоспрямований обмін електричною енергією, електромобілі інтегруються в локальну мікросистему житлового комплексу (ЖК), функціонуючи як мобільні установки зберігання енергії (УЗЕ), які здатні, до того ж, доставляти електричну енергію від віддалених джерел електропостачання.

Важливість досліджень полягає у підвищенні енергетичної стійкості та надійності електропостачання ЖК та інших об'єктів. Це дозволяє забезпечувати безперебійне живлення під час аварійних вимкнень, особливо в умовах нестабільності виробітку електричної енергії мікрогенерувальними установками на базі відновлюваних джерел енергії (ВДЕ).

Метою і завданнями дослідження є резервування систем комбінованого електропостачання житлових комплексів ресурсом електромобілів у години коли потужності локальних мікрогенерувальних установок не достатньо для покриття пріоритетних / критичних навантажень ЖК, а зовнішнє електропостачання від мережі оператора системи відсутнє.

Матеріал і результати досліджень. Для побудови мікросистем підвищеної стійкості і гнучкості вибрано дев'ятиповерховий житловий будинок з підземним паркінгом, який є спорудою подвійного призначення – укріттям.

У будинку наявні 5 ВРП. Розрахункові значення навантажень та добового споживання електричної енергії споживачами ЖК наведено у табл.1.

Таблиця 1 – Навантаження будинку

Найменування споживача	Нормальний режим		Острівний режим		Острівний режим, тривога	
	P_p , кВт	W , кВт·год	P_p , кВт	W , кВт·год	P_p , кВт	W , кВт·год
ВРП-3.1	213,98	1371,05	84,91	494,80	54,74	290,90
ВРП-3.2 (супермаркет)	100,00	456,00	86,02	392,25	10,60	48,34
ВРП-3.3 (супермаркет)	100,00	456,00	86,02	392,25	10,60	48,34
ВРП-3.4 (магазин)	75,00	526,00	65,60	460,07	10,36	72,66
ВРП-П	80,00	547,88	70,40	482,13	70,28	513,68
Разом по будинку	568,98	3356,93	392,95	2221,51	156,58	973,91

Наступним кроком було запроєктовано дахову фотоелектричну станцію (ФЕС) та УЗЕ, яка складається з 16 залізо-фосфатні ($LiFePO_4$) акумуляторних батарей типу LP $LiFePO_4$ Battery HVM, ємністю 124,518 кВт·год. Основними критеріями розрахунку УЗЕ були діапазон заряду/розряду 30–80 % та забезпечення живлення в острівному режимі під час оголошення тривоги упродовж доби.

Оскільки вартість однієї акумуляторної батареї типу LP $LiFePO_4$ Battery HVM складає 534,794 тис. грн, то загальна вартість проєктованої УЗЕ становитиме 8556,704 тис. грн. То ж

для зменшення кількості акумуляторів у запропонованій конфігурації УЗЕ варто розглянути технологію V2G для зарядних пунктів електромобілів у паркінгу будинку.

Технологія V2G або двостороннє живлення електромобілів являє собою підхід до використання акумуляторних батарей електромобілів. Вона перетворює електромобілі з пасивних споживачів електричної енергії на активні елементи енергетичної мережі, здатні як накопичувати енергію, так і віддавати її у систему.

У багатоповерховому будинку, що розглядається, планується встановлення 10-ти парко-місць для зарядки електромобілів. Тож до встановлення приймаються зарядні пристрої DCLO30A-V2G потужністю 30 кВт з технологією V2G від компанії Hongjiali у кількості 5 шт., кожна з яких здатна заряджати до двох електромобілів одночасно.

Оскільки вибрані зарядні станції не мають власного вбудованого накопичувального пристрою, а є лише засобом заряджання/розряджання електромобілів, то споживання електричної енергії яке вони можуть забезпечити ґрунтується на основі ємності приєднаних електромобілів. Згідно даних «Опендатабот» [6] найбільше було ввезено електромобілів від виробників: Tesla, Volkswagen, Nissan статистику за період з 2022 по 2024 рік наведено в табл. 2.

Таблиця 2 – Ввезені електромобілі 2022–2024 роки

Виробник	2022 р.	2023 р.	2024 р.	Разом
Volkswagen	8915	3194	1937	14046
Tesla	7622	4742	1570	13934
Nissan	5656	3034	2154	10844

Найпопулярнішими моделями цих виробників в Україні є Tesla Model 3 (ємністю 60 кВт·год), Nissan Leaf (ємністю 40 кВт·год) та Volkswagen ID.4 (ємністю 82 кВт·год) [6].

Для подальшого розрахунку було визначено середню ємність одного електромобіля в Україні:

$$C_{\text{ем}} = \frac{60 \cdot 13934 + 40 \cdot 10844 + 82 \cdot 14046}{13934 + 10844 + 14046} = 62,37, \text{ кВт} \cdot \text{год},$$

Оскільки в паркінгу розміщено 10 парко-місць з технологією V2G, маємо:

$$C_{\Sigma\text{ем}} = C_{\text{ем}} \cdot n_{\text{п.м.}} = 62,37 \cdot 10 = 623,7, \text{ кВт} \cdot \text{год},$$

Розраховано кількість акумуляторних батарей, яку замінять запропоновані зарядні станції:

$$n_{\text{акум.з}} = \frac{C_{\Sigma\text{ем}}}{C_{\text{еф}}} = \frac{623,7}{62,26} = 10,017 \approx 10, \text{ шт.}$$

Тобто, при реалізації 10-ти парко-місць з технологією V2G конфігурація проєктованої УЗЕ зменшиться з 16-ти до 6-ти акумуляторних батарей.

Орієнтовна ціна зарядної станції з технологією V2G потужністю 30 кВт складає 200 тис. грн. Розрахуємо вартість системи УЗЕ при впровадженні V2G:

$$E = n_{\text{акум}} \cdot C_{\text{акум}} - n_{\text{акум.з}} \cdot C_{\text{акум}} + n_{\text{з.с.}} \cdot C_{\text{з.с.}} = \\ = 16 \cdot 534,794 - 10 \cdot 534,794 + 5 \cdot 200 = 4208,764, \text{ тис. грн},$$

У відсотковому значенні економія складе:

$$\Delta E = \frac{8556,704 - 4208,764}{8556,704} \cdot 100 = 50,81 \, \%.$$

Висновок. Підсумовуючи, впровадження п'яти двоспрямованих зарядно-розрядних станцій в межах досліджуваного житлового комплексу, що функціонують за технологією V2G, забезпечує суттєвий економічний ефект. Ця інтеграція дозволяє оптимізувати капітальні інвестиції, що виділяються на інсталяцію стаціонарних УЗЕ.

Згідно з проведеними розрахунками, досягається пряме зниження необхідних капіталовкладень до 4,2 млн грн. У відносному вимірі це скорочення становить 50,81 % від загального бюджету, передбаченого на встановлення зазначених УЗЕ, підтверджуючи високу інвестиційну ефективність V2G-рішення для підвищення надійності електропостачання ЖК.

Список використаних джерел

1. ДБН В.2.5-23:2010 Інженерне обладнання будинків і споруд. Проектування електрообладнання об'єктів цивільного призначення. Київ: Мінрегіонбуд України, 2010. 40 с.
2. System Advisor версії 2023.12.17 (SAM 2023.12.17). Національна лабораторія відновлюваної енергетики. Голден, Колорадо. <https://sam.nrel.gov> (13.02.2025).
3. Правила улаштування електроустановок. Київ: Міненергосугілля України, 2017. – 617 с.
4. ДБН В.2.2-41:2019 Висотні будівлі. Основні положення. Київ, Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2019, С. 47-49.
5. ДБН В.1.2-7-2008. Основні вимоги до будівель і споруд. Пожежна безпека. Вид.офіц. Київ: Держстандарт України
6. <https://opendatabot.ua/analytics?theme=%D0%95%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BA%D0%B0%D1%80%D0%B8>

ОСОБЛИВОСТІ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ДВОСТОРОННІХ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ

Вступ: Розвиток концепцій екології та енергоефективності спричиняють потребу в розвитку сучасних енергоефективних відновлюваних технологій, яким якраз і відповідають сучасні двосторонні фотоелектричні модулі, ефективність яких потрібно збільшувати, що в свою чергу спричиняє потребу в наукових дослідженнях цієї проблеми. Адже, двосторонні сонячні панелі характеризуються збільшенням потужності, використовуючи меншу площу земельної ділянки для їх встановлення. Розвиток використання двосторонніх сонячних панелей сповільнюється через високу вартість сонячних панелей з використанням двох сторін, складність монтажу та більшу вартість систем кріплення, які потрібно використовувати для їх встановлення.

Основна частина: Двосторонні фотоелектричні модулі (сонячні панелі) – фотоелектричні модулі, які використовують меншу площу для збільшення поглинання сонячного випромінювання, використовуючи дві сторони, де передня сторона поглинає пряме сонячне випромінювання, а зворотня відбите та/або розсіяне. Двосторонні фотоелектричні модулі (PV) за складом поділяються на дві частини – передня (фронтальна) сторона PV та зворотня (тильна) сторона PV. Двосторонні PV мають перевагу над односторонніми в тому, що можуть мати більшу ефективність завдяки більшому поглинанню сонячного випромінювання одночасно на двох сторонах PV.

Одним із варіантів підвищення ефективності використання PV-панелей є застосування спеціальних підстилаючих відбиваючих покриттів. Розглянемо дослідження PV панелей з використанням підстилаючої відбиваючої поверхні з матеріалом, який має різне альbedo. Альbedo описує інтенсивність відбитого світла в залежності від інтенсивності падаючого на поверхню матеріалу. Тому в роботі представлені різні дослідження зростання генерації електроенергії двосторонніми PV за рахунок використання матеріалів з більшим альbedo та їхній аналіз.

Поверхня з певним альbedo залежить від кольору матеріалу, а також від самого матеріалу. Детальніше дослідження поверхонь, якого матеріалу, до якого спектру належить, описано в [1]. Кожний матеріал можна охарактеризувати одним із двох параметрів – альbedo, та другим параметром, який є наслідком роботи фотомодулів при відбиваючих матеріалах з різним альbedo – двосторонній приріст енергії, який характеризує виробництво електроенергії тильною стороною двосторонньої сонячної панелі у відношенні до генерації одностороннім фотомодулем.

Біле агроволокно здатне підвищити генерацію двосторонніх PV в порівнянні з односторонніми на 12-16 %, якщо агроволокно розташовано прямо під сонячними панелями. Якщо чорне агроволокно розташовується під сонячними панелями по-різному, то двосторонній приріст енергії буде варіюватися 8-10 %. Біло-зелене агроволокно буде підвищувати генерацію на 13 %. Не використовуючи жоден матеріал, двосторонній приріст енергії прирівнюється до двостороннього приросту з використанням чорного агроволокна, тобто 8-10 %. Найбільшим двостороннім приріст енергії буде для двосторонніх PV з використанням снігу, який становить 26-34 %. Всі ці дані наведені в експериментальному дослідженні [2].

В дослідженні [3] наведені дані використання інших матеріалів відбивачів для тих самих параметрів роботи сонячних панелей з урахуванням різного альbedo. Було досліджено саме такі матеріали в якості відбивачів з такими значеннями альbedo: біла плитка з альbedo

0,7-0,8, білі камінці – 0,5-0,6, бетон – 0,3-0,35, та ґрунт – 0,1-0,15. Використовуючи білі плитки для сонячних панелей, можна досягнути найвищого двостороннього приросту енергії – 14,3-25 %, для білих камінців двосторонній приріст може варіюватися від 2,8 % до 22 %, для бетону – може складати від 2,4 % до 18,6 %, а для ґрунту проводилися дослідження з іншими параметрами та іншими залежностями. В цьому ж дослідженні проводилися визначення ефективності сонячних панелей за допомогою лінійної залежності між генерацією електроенергії двосторонніми PV та загальним ефективним випромінюванням, де за встановленою залежністю визначався кутовий коефіцієнт, який дорівнював ефективності роботи сонячних панелей, який в результаті вийшов в даному дослідженні – 32 %.

В дослідженні [4] використовуються тільки два світловідбиваючі матеріали – біла фольга та алюмінієві листи, покриті білою фарбою, які мають коефіцієнт відбиття понад 90 %. За допомогою фольги відбувається збільшення ефективності двосторонніх PV в порівнянні з односторонніми на 18 %. Білий дифузний відбивач, який виготовлений з алюмінієвих листів, покритих білою фарбою, який прикріплений до модулів, дозволяє підвищити ефективність двосторонніх PV площею 1,075 м² до 7,5 %, а ефективність двосторонніх PV з площею 0,536 м² підвищується до 12,1 %. Така різниця в ефективності для різних площ панелей є наслідком більшої площі модуля.

Дослідження [5] стосується вивчення підвищення ефективності двосторонніх PV за допомогою радіаційного охолодження з використанням відбиваючого покриття. В якості відбивача використовується наноПАН-волокно, що складається з високоякісних полімерів, які мають хорошу відбиваючу здатність. Особливо вона покращена в ближньому інфрачервоному та ультрафіолетовому областях, в результаті чого сонячно-зважена відбивна здатність дорівнює $99 \pm 0,5$ %, який прирівнюється до альbedo снігу. Використання наноПАН в якості рефлектора для двосторонніх PV дозволяє підвищити напругу холостого ходу, створеного модулем. Густина струму при використанні такої відбиваючої системи збільшується від 3,93 до 6,42 мА/см².

Висновок: Отже, для значного підвищення ефективності двосторонніх PV краще використовувати відбиваючі поверхні модулів, і саме білого кольору. Найкращим серед білих матеріалів є наноПАН, який прирівнюється до природнього білого снігу за відбиваючими властивостями. Наступним кроком буде подальше практичне дослідження відбиваючих матеріалів та оцінювання їх ефективності для двосторонніх сонячних панелей.

Список використаної літератури

1. Мальований М. О., Пилипенко О. В. Дослідження енергетичних рівнів напівпровідників. Метод ІЧ Спектроскопії : кваліфікаційна робота. Суми : Сумський державний університет, 2024. 33 с.
2. Юраш О. В., Гаєвський О. Ю., Дмитренко О. О. Робота двосторонніх фотоелектричних модулів в умовах затінення та різної відбиваючої поверхні : магістерська дисертація. Київ : КПІ ім. І. Сікорського, 2024. 148 с.
3. Performance analysis and comparison between bifacial and monofacial solar photovoltaic at various ground albedo conditions. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1755008423000066> (дата звернення: 09.11.2025).
4. A Review of Different Types of Solar Cell Materials Employed in Bifacial Solar Photovoltaic Panel. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/8/3605> (дата звернення: 09.11.2025).
5. High albedo daytime radiative cooling for enhanced bifacial PV performance. URL: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/nanoph-2023-0611/html> (дата звернення: 09.11.2025).

БЛОКЧЕЙН ЯК АВТЕНТИФІКАЦІЯ ЗЕЛЕНОЇ ЕНЕРГІЇ

Досягнення «подвійних цілей з декарбонізації» (carbon peak та carbon neutrality) є надзвичайно складним завданням для електроенергетичної галузі. Окрім заміни традиційних джерел енергії відновлюваними та побудови циркулярної економіки, цифрові технології та платформи відіграють дедалі важливішу роль завдяки своїм перевагам у покритті, оперативності, підвищенні довіри та створенні позитивних стимулів.

Головна мета торгівлі вуглецем — зробити екологічні фактори оплачуваними складовими виробництва за допомогою ринкових механізмів. Такі активи, як права на викиди CO₂ та зелена електроенергія, розглядаються як товари на ринку, що стимулює виробників нової енергії та споживачів збільшувати частку «чистої» енергії.

У Китаї система торгівлі вуглецем включає три типи товарів:

- вуглецевий кредит (carbon credit),
- сертифіковане скорочення викидів (CCER),
- зелена електроенергія.

Підприємства, обмежені лімітом на викиди, повинні дотримуватись верхньої межі; інші компанії можуть компенсувати свої надлишкові викиди через придбання CCER. Торгівля «зеленою» електроенергією допомагає безпосередньо зменшити попит на традиційне енергетичне виробництво, тим самим знижуючи загальні викиди CO₂. Три типи товарів взаємно доповнюють один одного, підтримуючи низьковуглецеве виробництво та експлуатацію енергосистеми.

Зелена електроенергія як товар створена для джерел, таких як сонячна та вітрова енергія, у межах середньо- та довгострокових контрактів на торгівлю електроенергією. Окрім продажу енергії в мережу, створено механізм прямої торгівлі між виробниками та споживачами [1].

Щоб підвищити рівень споживання «зеленої» енергії, уряд надає преференції — у пріоритеті організація, виконання та розрахунки за «зеленими» контрактами. Очікується, що в майбутньому ринкова участь у таких торгах значно зростатиме.

Мета роботи: розгляд технологій блокчейну, для забезпечення автентифікацію зеленої електроенергії та подальшого прискорення її споживання.

Матеріал досліджень. На початковому етапі торгівлі зеленою електроенергією існує багато труднощів — дублювання вимірювань, перевірок, повторні звіряння, а подекуди навіть фальсифікація даних.

Технологія блокчейн має риси децентралізації, захисту від змін, відкритості та прозорості, що забезпечує надійність даних і транзакцій [2].

Зокрема:

– Розподілений реєстр (distributed ledger) зберігає дані всього ланцюга — від виробництва до споживання.

– Механізм консенсусу (consensus mechanism) дозволяє учасникам взаємно перевіряти й підтверджувати достовірність інформації.

– Смартконтракти (smart contracts) автоматично виконують торговельні угоди та розрахунки.

– Електронний підпис (e-signature) використовується для видачі зелених сертифікатів, що дає змогу точно відстежувати кожну угоду протягом усього життєвого циклу електроенергії та підвищує авторитетність сертифікації її споживання.

Технологія блокчейн має вирішальне значення для побудови ефективного, справедливого та відкритого ринку торгівлі зеленою електроенергією.

Carbon inclusion означає кількісну оцінку екологічної та низьковуглецевої поведінки громадян і малих підприємств, а також створення системи позитивного стимулювання, що поєднує державні та бізнес-ініціативи з торгівлею сертифікованими скороченнями викидів. Наразі різні платформи розробляють власні методики обліку енергозбереження та скорочення викидів, але єдиного стандарту поки немає. Через це частина «зелених» дій не враховується в офіційній статистиці.

Наприклад, користувач, який встановив домашню сонячну установку, економить енергію, але для системи обліку це виглядає лише як зменшення платіжки. Щоб така система працювала, потрібна єдина методологія та авторитетна сертифікація екологічних дій. Блокчейн стандартизує сертифікацію вуглецевого скорочення в енергетиці.

Екосистема «*carbon inclusion*» охоплює багато учасників і складні процеси. Блокчейн забезпечує її функціонування завдяки розподіленому реєстру, консенсусній перевірці, смартконтрактам тощо. Так можна фіксувати та підтверджувати поведінку користувачів, що сприяє економії енергії та скороченню викидів, а також забезпечувати прозорість і достовірність даних.

Технології *IoT* (інтернет речей) автоматично збирають і передають дані на блокчейн, мінімізуючи ручні втручання. Технології захисту конфіденційності дозволяють одночасно зберігати відкритість даних і захищати персональну інформацію.

Так, наприклад, китайська компанія, що виробляє електромобілі, створила відкрите блокчейн-середовище, яке підключає 341 сенсор і 66 контролерів автомобіля. Уся інформація записується в децентралізований блокчейн у реальному часі. Смартконтракт автоматично конвертує дані про поїздки та викиди у вуглецеві кредити. Власники автомобілів можуть обмінювати кредити на бонуси чи пільги, що створює позитивну мотивацію для низьковуглецевої поведінки.

Висновок: блокчейн активно застосовується у сценаріях *carbon inclusion*, але головними гравцями залишаються державні органи та платформні провайдери. Ринок торгівлі зеленою електроенергією перебуває на пілотній стадії, а блокчейн — у фазі технічних досліджень, подання патентів і розробки стандартів.

Майбутні напрями розвитку:

– Створення механізму торгівлі зеленою електроенергією та регіональних ринків оптової електроенергії з операціями «на ланцюгу» (*on-chain*).

– У сценаріях з безпосередньою участю споживачів (розумні кампуси, віртуальні електростанції тощо) — розвиток регіональних блокчейнів для роздрібної торгівлі електроенергією та сертифікації «вуглецевої поведінки».

Список використаної літератури

1. Digitalization Trends in the Electric Power Industry 2030 / Huawei Technologies Co., Ltd. — Shenzhen : Huawei, 2023. — 68 p. — ISBN 978-1-63987-654-3.

2. V. Khilenko, S. Denysiuk and H. Bielokha, "Improving the Quality of Transactional Management of Electric Vehicle Charging in Local Electricity Networks Based on Blockchain," 2024 4th International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME), Male, Maldives, 2024, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICECCME62383.2024.10796784.

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ЧАСТОТНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЗМІННОГО СТРУМУ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

У роботі наведена порівняльна оцінка енергоспоживання двох моделей перетворювачів частоти – Siemens SINAMICS G120 та SEW-Eurodrive MDX61B – під час регулювання швидкості асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором у режимі холостого ходу. Експериментально досліджено залежність величини змінного струму від швидкості обертання ротора електродвигуна в усталеному та перехідних режимах, визначено особливості алгоритмів керування частотними регуляторами.

Ключові слова: частотний перетворювач, автоматизований електропривод, енергоефективність, програмований логічний контролер.

Вступ

Сучасні промислові виробничі системи неможливі без автоматизованого керування електроприводом. Важливу роль у таких системах відіграють частотні перетворювачі (ЧП), які дозволяють регулювати швидкість обертання асинхронних двигунів за рахунок зміни частоти та величини напруги живлення [1]. Вибір типу перетворювача безпосередньо впливає на динамічні властивості електроприводу, енергоефективність та інтеграцію із засобами автоматизації. Незважаючи на значний асортимент продукції від провідних виробників, серед яких Siemens, ABB та SEW-Eurodrive, пошук оптимального рішення часто обмежується суб'єктивними або фінансовими факторами через недостатню кількість об'єктивних експериментальних результатів. Метою даної роботи є проведення безпосереднього порівняльного аналізу характеристик популярних моделей ЧП в ідентичних умовах експлуатації.

Мета дослідження – оцінка ефективності та стабільності роботи двох моделей частотних перетворювачів – SINAMICS G120 [2] та SEW-Eurodrive Movimax MDX61B [5], - інтегрованих в єдину систему керування на базі ПЛК Siemens S7-1200 [4].

В якості об'єкта дослідження обрано асинхронний електродвигун RAVEO RT1A 562-4 [3]. Експериментальний лабораторний стенд включав такі компоненти:

- Програмований логічний контролер Siemens S7-1200 (CPU 1214C DC/DC/DC), використовувався для формування завдання швидкості обертання та збору даних.

- Частотні перетворювачі:

- Siemens SINAMICS G120 із силовим модулем PM240-2 (6SL3210-1PB13-0ALA);
- SEW-Eurodrive Movimax MDX61B (MDX61B0005-5A3-4-0T/DFE32B).

- Систему моніторингу: енкодер для вимірювання швидкості обертання та вбудовані засоби ЧП для вимірювання електричних параметрів.

- Панель керування Siemens SIMATIC KTP700 Basic PN - 6AV2123-2GB03-0AAX0

Зв'язок між усіма компонентами стенда було реалізовано через промислову мережу PROFINET.

Вимірювання струму, що споживається двигуном, здійснювалося безпосередньо частотними перетворювачами з подальшою передачею через панель керування на ПК. Експеримент передбачав циклічну зміну швидкості двигуна – від 0 до 1500 об/хв – для оцінки статичних та динамічних характеристик.

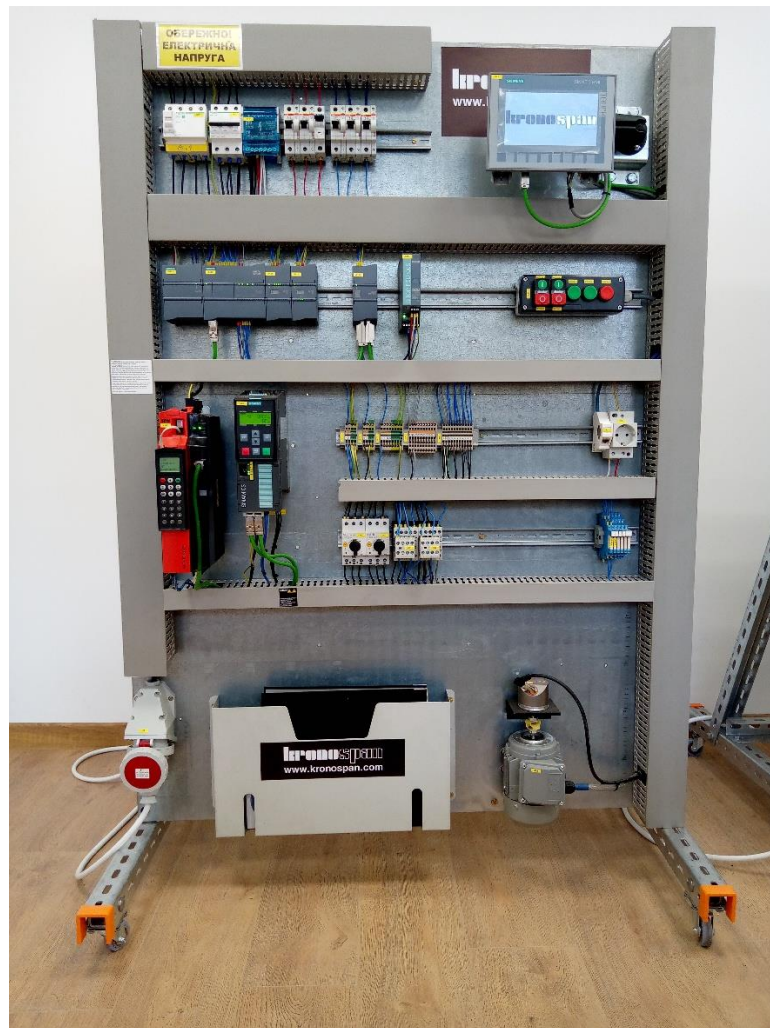


Рисунок 1 – Лабораторний стенд

Результати та їх аналіз

У режимі очікування (0 об/хв) було виявлено значну різницю у власному споживанні струму перетворювачами. ЧП SINAMICS G120 показав значення в межах 0,0015-0,0024 А, тоді як SEW MDX61B – стабільно 0,004 А. Ця відмінність вказує на менші втрати в силовому модулі перетворювача Siemens у стані спокою, що може мати значення для систем із тривалими паузами в роботі.

Результати дослідження в сталому режимі при різних швидкостях обертання двигуна без навантаження занесені до табл. 1.

Таблиця 1 Порівняння струмів холостого ходу в сталому режимі

Швидкість, об/хв	Струм SINAMICS G120, А	Струм SEW MDX61B, А
100	0,606	0,499
300	0,604	0,477
500	0,622	0,454
700	0,578	0,455
900	0,527	0,471
1200	0,546	0,486
1500	0,515	0,473

Аналіз отриманих експериментальних даних виявив принципові відмінності у характеристиках досліджуваних частотних перетворювачів. Перетворювач SEW MDX61B демонстрував нелінійну залежність струму від швидкості з мінімальним споживанням 0,454 А при 500 об/хв. У робочому діапазоні від 500 об/хв до 1500 об/хв спостерігалась відносна стабільність значень струму з незначними коливаннями в межах 0,02 А від середнього рівня, що свідчить про оптимізовані алгоритми керування. На противагу цьому, перетворювач

SINAMICS G120 мав більш виражену нелінійну характеристику з чітким піком споживання 0,622 А при 500 об/хв. Із зростанням швидкості від 500 до 900 об/хв відбувається значне зниження струму на 0,095 А, після чого на високих швидкостях від 900 до 1500 об/хв стабілізується в діапазоні 0,515-0,546 А.

Отримані результати дозволяють зробити припущення щодо особливостей алгоритмів компенсації ковзання та намагнічуючого струму, реалізованих у досліджуваних перетворювачах. Високий пік струму SINAMICS G120 на середніх швидкостях може бути пов'язаний з агресивною стратегією керування магнітним потоком двигуна, спрямованою на підвищення моменту, що може бути вигідним під час роботи під навантаженням, але призводить до надмірних витрат енергії на холостому ході.

Натомість, більш плавна характеристика SEW MDX61B свідчить про пріоритет енергоефективності та мінімізації втрат у широкому діапазоні швидкостей, що досягається за рахунок точнішої адаптації V/f характеристики під конкретні умови роботи.

Порівняльна оцінка показує, що SEW MDX61B має переваги в середньому та високому діапазоні швидкостей, підтримуючи нижній і стабільний рівень споживання, тоді як SINAMICS G120 демонструє кращі показники енергоефективності лише на швидкостях понад 900 об/хв. На низьких швидкостях у діапазоні 100-300 об/хв обидва перетворювачі мають приблизно однакове споживання. Виявлені особливості підтверджують суттєві відмінності у реалізації алгоритмів керування V/f характеристик досліджуваних перетворювачів, що обумовлює різну енергоефективність залежно від робочого діапазону швидкостей. У перехідних режимах (розгін та гальмування) обидва перетворювачі функціонували коректно, без небезпечних стрибків струму.

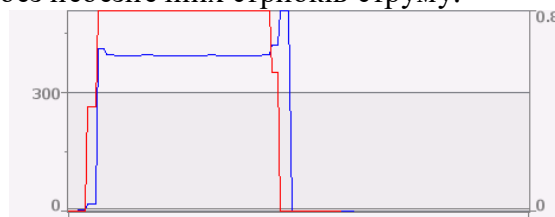


Рисунок 2 - Залежність швидкості обертання (червона крива) та струму двигуна (синя крива) від часу для частотного перетворювача SEW MDX61B на швидкості 500 об/хв [6]

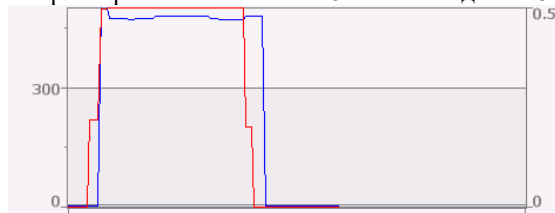


Рисунок 3 - Залежність швидкості обертання (червона крива) та струму двигуна (синя крива) від часу для частотного перетворювача SINAMICS G120 на швидкості 500 об/хв [6]

Дослідження динамічних режимів роботи підтвердило істотні відмінності у характеристиках перетворювачах від час перехідних процесів. Перетворювач SINAMICS G120 забезпечував інтенсивний динамічний розгін, що супроводжувалося значно вищими значеннями пускового струму, який досягав 0,74 А при розгоні до швидкості 300 об/хв. На противагу цьому, перетворювач SEW MDX61B демонстрував принципово іншу динамічну поведінку, яка характеризувалася значно більш плавним розгоном із обмеженням пускового струму на рівні до 0,57 А при аналогічних умовах розгону. Така характеристика SEW MDX61B має практичну цінність, оскільки сприяє зменшенню динамічних навантажень на механічні компоненти електропривода, а також знижує навантаження на електромережу, що позитивно впливає на її стабільність і довговічність обладнання.

Важливо зазначити, що різниця в динаміці не пов'язана з різними налаштуваннями часу розгону за замовчуванням. Дослідження проводилися на фіксованому часі розгону 2 секунди.

Однак, навіть за однакових заданих параметрів прискорення, відмінності в структурі системи керування призводять до різної реакції на зміну завдання. Це підкреслює

необхідність не лише вибору обладнання, але й його глибокого налаштування під конкретну технологічну задачу для досягнення оптимального балансу між динамікою та енергоефективністю.

Висновки

Проведені експериментальні дослідження дозволили отримати об'єктивні порівняльні дані щодо енергоефективності частотних перетворювачів Siemens SINAMICS G120 та SEW-Eurodrive Movimax MDX61B у різних режимах роботи.

У статичному режимі було виявлено суттєві відмінності у характеристиках енергоспоживання. Перетворювач SEW MDX61B продемонстрував більш стабільну роботу в середньому та високому діапазоні швидкостей (500-1500 об/хв), підтримуючи струм споживання на рівні 0,454-0,473 А з мінімальним відхиленням. В порівнянні з ним, SINAMICS G120 показав виражену нелінійну залежність із піком споживання 0,622 А при 500 об/хв, але з подальшим зниженням струму на високих швидкостях до 0,515 А при 1500 об/хв.

У динамічних режимах також виявлено принципові відмінності: SINAMICS G120 забезпечував інтенсивний розгін із вищим пусковим струмом (до 0,74 А), тоді як SEW MDX61B характеризувався більш плавною динамікою з обмеженням пускового струму (близько 0,57 А), що є перевагою для зменшення механічних навантажень та струмових ударів у мережі.

Отримані результати підтверджують, що вибір оптимального частотного перетворювача має ґрунтуватися на аналізі конкретних умов експлуатації та його алгоритмів керування.

Із проведених досліджень видно, що для процесів із тривалими періодами роботи на середніх та високих швидкостях та вимогами до стабільності енергоспоживання доцільнішим є застосування SEW MDX61B. Для систем, де пріоритетом є швидкодія при розгоні, а робота відбувається переважно на високих швидкостях, може бути ефективнішим SINAMICS G120.

Список використаних джерел

1. Ковальов О. В. Електропривід змінного струму [Електронний ресурс] : навч. посіб. / О. В. Ковальов, О. О. Семенов. – Вінниця : ВНТУ, 2015. – 183 с. – URL: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/29209/9300.pdf?sequence=3> (дата звернення: 03.11.2025).
2. SINAMICS G120 Operating Instructions PM240-2 Power Modules [Електронний ресурс] / Siemens AG. – 2021.– URL: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/104/109801104/att_1077039/v1/G120_PM240-2_hw_inst_man_0621_en-US.pdf (дата звернення: 03.11.2025). – Тит. екрану. – Англ.
3. AC MOTORY [Електронний ресурс] / Raveo. – 2016. – URL: https://www.raveo.cz/productmanager/wp-content/uploads/2023/01/ac-motory-raveo-2016-11_0.pdf (дата звернення: 03.11.2025). – Тит. екрану.
4. MOVIDRIVE MDX60B/61B System Manual [Електронний ресурс] / SEW-EURODRIVE. – URL: <https://download.sew-eurodrive.com/download/pdf/16838017.pdf> (дата звернення: 03.11.2025). – Тит. екрану. – Англ.
5. Експериментальні результати досліджень [Електронний ресурс] // Google Диск. – URL: https://drive.google.com/drive/folders/1okbtEYKP66xNRHUnTlcCVw_K0ZpKqxqP (дата звернення: 03.11.2025).

ОПТИМІЗАЦІЯ СОНЯЧНОЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ. ПРИНЦИП РОБОТИ ОПТИМІЗАТОРА НАПРУГИ

Упродовж останніх десятиліть сонячна енергетика стала одним із ключових драйверів глобального енергетичного переходу. Фотоелектрична генерація демонструє найвищі темпи приросту серед усіх відновлюваних джерел енергії, а сумарні світові встановлені потужності сонячних електростанцій уже перевищили 1 ТВт. Така динаміка зумовлена технологічним прогресом, значним здешевленням фотоелектричних модулів та інверторного обладнання, а також підвищенням їхньої надійності та ефективності.[1]

Згідно з аналітичними даними, вартість виробництва енергії з фотоелектричних станцій у період 2010–2022 рр. зменшилася більш ніж на 80 %, що зробило сонячну енергетику однією з найдешевших технологій генерації у світі. Водночас підвищення енергетичної безпеки, необхідність скорочення викидів парникових газів та глобальні процеси декарбонізації посилюють актуальність упровадження високоефективних фотоелектричних систем.[2]

Попри значний прогрес, сучасні фотоелектричні установки залишаються вразливими до низки експлуатаційних факторів, серед яких особливо критичними є часткове затінення, нерівномірне забруднення модулів та деградація їх електричних характеристик. Ці чинники призводять до суттєвих невідповідностей між окремими панелями в стрінгу, що знижує загальну продуктивність станції та збільшує втрати енергії. У цьому контексті особливої ваги набувають технології оптимізації роботи фотоелектричних систем, зокрема використання модульних оптимізаторів напруги та локальних систем МРРТ-керування.[3]

Таким чином, розвиток сонячної енергетики та впровадження новітніх підходів до підвищення її ефективності є важливими передумовами забезпечення стабільного, екологічно безпечного та економічно обґрунтованого енергозабезпечення. Вивчення рішень, спрямованих на оптимізацію роботи фотоелектричних станцій, залишається одним із найбільш актуальних напрямів сучасних енергетичних досліджень.

Принцип роботи оптимізаторів напруги та їх роль у підвищенні ефективності сонячних електростанцій

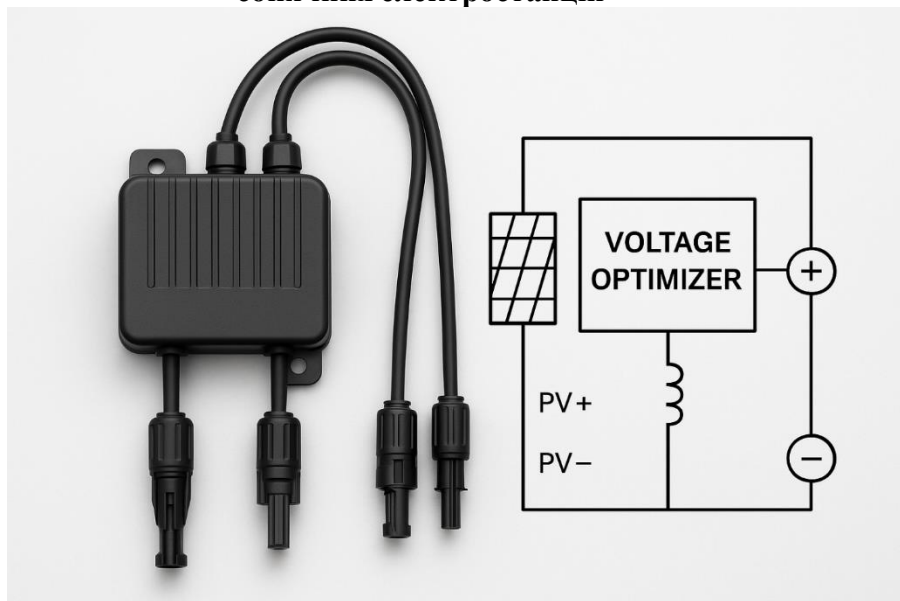


Рисунок 1 – Зображення оптимізатора напруги, спрощена електрична схема.

Оптимізатори напруги є елементами електроніки потужності, які встановлюються на кожен фотоелектричний модуль або групу модулів для забезпечення індивідуального керування їхньою роботою. Основним призначенням оптимізатора є локальне відстеження точки максимальної потужності (MPPT) та стабілізація вихідних параметрів модуля незалежно від стану інших елементів стрінгу. На відміну від традиційних стрінгових інверторів, які виконують MPPT на рівні всього ланцюга, оптимізатор забезпечує роботу кожної панелі в її індивідуальній оптимальній робочій точці.

Принцип роботи

Оптимізатор напруги функціонує як перетворювач постійної напруги типу DC–DC (переважно топології buck, boost або buck–boost).

Основні етапи його роботи такі:

Вимірювання параметрів модуля.

Оптимізатор постійно контролює струм, напругу, температуру та освітленість фотоелектричного модуля.

Локальне MPPT-керування.

За допомогою алгоритмів, зокрема Perturb & Observe або Incremental Conductance, пристрій визначає точку максимальної потужності для кожної панелі індивідуально.[5]

DC–DC перетворення.

Залежно від умов, оптимізатор:

- підвищує напругу (boost),
- знижує напругу (buck),
- або адаптує її у ширшому діапазоні (buck–boost),

забезпечуючи узгодження вихідних параметрів з робочими умовами всього стрінгу.

Передача стабілізованої енергії до інвертора.

Оптимізатор підтримує постійну або задану напругу на вході інвертора, що забезпечує стабілізовану роботу системи, навіть якщо окремі модулі затінені або працюють у несприятливих умовах.

Роль оптимізаторів у підвищенні ефективності СЕС. Використання оптимізаторів напруги дозволяє вирішити низку проблем, характерних для фотоелектричних систем:

Зменшення втрат від часткового затінення.

При традиційному стрінговому з'єднанні один затінений модуль обмежує струм усього стрінгу. Оптимізатор ізолює слабкий модуль, не даючи йому впливати на роботу інших панелей.[6]

Зменшення втрат від невідповідності характеристик модулів.

Виробничі відхилення, деградація, забруднення та різні кути нахилу панелей спричиняють розбалансування системи. Оптимізатори компенсують такі відмінності, забезпечуючи стабільний енергозбір.

Підвищення загальної енерговіддачі. Згідно з дослідженнями Fraunhofer ISE, застосування модульних оптимізаторів може підвищити річну генерацію на 5–25 % залежно від конфігурації системи та рівня затінення.[7]

Оптимізація систем із різною орієнтацією модулів. Оптимізатори дозволяють поєднувати панелі на різних площинах чи з різними кутами нахилу без суттєвих втрат енергії, що є недоступним для класичних стрінгових схем.[8]

Підвищення надійності та діагностичності системи.

Більшість оптимізаторів інтегровані з системами моніторингу, що забезпечує детальний контроль кожного модуля, своєчасне виявлення дефектів та зниження витрат на експлуатацію.[9]

Наукове та практичне значення Завдяки модульному MPPT-керуванню оптимізатори напруги суттєво підвищують продуктивність та гнучкість сонячних електростанцій, забезпечуючи стабільну роботу системи в умовах реальних експлуатаційних викликів. Їх

застосування особливо актуальне для дахових СЕС у міських умовах, де затінення та неоднорідні умови освітлення є поширеною проблемою.

Список використаних джерел

1. International Energy Agency (IEA). Renewables 2023. Analysis and Forecast to 2028. Paris: IEA, 2023.
2. International Renewable Energy Agency (IRENA). Renewable Power Generation Costs in 2022. Abu Dhabi: IRENA, 2022.
3. Beluco, A., D. de Souza, L. Kissinger. "Influence of Partial Shading on Photovoltaic Systems: A Comprehensive Review." *Solar Energy*, vol. 221, 2021, pp. 105–121.
4. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE. Photovoltaics Report. Freiburg, 2023.
5. Hohm, D. P., & Ropp, M. E. "Comparative Study of Maximum Power Point Tracking Algorithms." *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 18(2), 2003.
6. Kroposki, B. et al. Maximizing PV System Output with Advanced Power Electronics. NREL Technical Report, 2017.
7. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE. Photovoltaics Report, 2023.
8. SolarEdge Technologies. Module-Level Power Electronics (MLPE) Performance Overview., 2022.
9. Peng, J., Lu, L., & Yang, H. "Review on Impacts of Partial Shading on PV Performance." *Renewable Energy*, 2020.
10. International Renewable Energy Agency (IRENA). Innovation Landscape for a Renewable-Powered Future., 2019.

РОЗРОБЛЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ «РОЗУМНИЙ БУДИНОК» З ІНТЕГРАЦІЄЮ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ ДЛЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО КЕРУВАННЯ ПОБУТОВИМИ ПРОЦЕСАМИ

Сучасний розвиток інформаційних технологій та відновлюваної енергетики сприяє активному впровадженню концепції «розумний будинок», яка передбачає автоматизоване керування побутовими процесами з метою підвищення комфорту, безпеки та енергоефективності житла. В умовах енергетичної нестабільності та зростання тарифів на електроенергію актуальним є використання відновлюваних джерел енергії, зокрема сонячних панелей, інтегрованих у систему автоматизованого енергоменеджменту.

Використання фотоелектричних систем у поєднанні з інтелектуальними контролерами дає змогу не лише зменшити споживання енергії з мережі, а й оптимізувати роботу побутових приладів відповідно до реальних умов освітленості, часу доби чи наявності користувачів у приміщенні. Це дозволяє досягти високого рівня енергоефективності, автономності та екологічності житлових будівель.

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю розроблення комплексної автоматизованої системи, яка забезпечить взаємодію між сонячною електростанцією, побутовими споживачами та інтелектуальним модулем керування. Така система може стати основою для створення енергоефективних житлових комплексів нового покоління, що відповідають сучасним стандартам сталого розвитку.

Мета роботи полягає у розробленні автоматизованої системи «розумний будинок» з інтеграцією сонячних панелей, що забезпечує оптимальне керування енергоспоживанням побутових приладів, підвищення рівня енергоефективності та зниження навантаження на централізовані електромережі.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі **завдання дослідження**:

1. Провести аналіз сучасних технологій систем «Smart Home» та принципів їх енергетичної інтеграції.
2. Розробити архітектуру апаратно-програмного комплексу автоматизованого керування побутовими процесами.
3. Забезпечити інтеграцію сонячних панелей у систему керування з урахуванням балансу споживання та генерації енергії.
4. Розробити алгоритми автоматичного розподілу електроенергії між споживачами залежно від пріоритетів та часу доби.
5. Провести моделювання енергоефективності системи та оцінити потенційну економію електроенергії.
6. Визначити вимоги до безпеки, надійності та можливості масштабування системи.

Архітектура та функціонування. Система «розумний будинок» поєднує фотоелектричний модуль із MPPT-керуванням, гібридний інвертор та акумуляторний блок з BMS у єдину енергетичну підсистему, що взаємодіє з контуром побутових навантажень і мережею. Контролер енергоменеджменту (EMS) збирає телеметрію з інвертора, двонапрявного лічильника та датчиків мікроклімату, нормалізує дані, оцінює поточний баланс і прогноз близького горизонту, після чого видає команди керування реле/контакторами. Пріоритети навантажень задаються профілями: критичні забезпечуються завжди, стандартні — за достатності ресурсу, гнучкі — у «вікна» надлишку генерації або низького тарифу. Інтерфейси зв'язку реалізовані через RS-485 (Modbus) та Ethernet/Wi-Fi (MQTT/HTTP), НМІ — локальна веб-панель із ролями доступу.

Математичне підґрунтя керування. Розподіл енергії в кожен момент часу описується балансом потужностей:

$$P_{PV}(t) + P_{grid}^{imp}(t) + P_{batt}^{dis}(t) = P_{load}(t) + P_{batt}^{ch}(t) + P_{grid}^{exp}(t) + P_{loss}(t).$$

Температура осередку фотомодуля та її вплив на генерацію моделюються співвідношеннями:

$$T_c(t) = T_a(t) + \frac{NOCT - 20}{800} G(t),$$

$$P_{PV}(t) = P_{STC} \frac{G(t)}{G_{STC}} [1 + \gamma(T_c(t) - 25^\circ C)] \eta_{MPPT} \eta_{wire}.$$

Переходом на змінний струм керує інвертор з ККД, що залежить від навантаження:

$$P_{ac}(t) = \eta_{inv}! (P_{dc}(t)) P_{dc}(t), \quad P_{dc}(t) = P_{PV}(t) - P_{batt}^{ch}(t) + P_{batt}^{dis}(t).$$

Стан заряду акумулятора у дискретному часі оновлюється з урахуванням ККД заряд/розряд та обмежень безпеки:

$$SOC_{t+\Delta t} = SOC_t + \frac{\eta_{ch} P_{batt}^{ch}(t) - \frac{P_{batt}^{dis}(t)}{\eta_{dis}}}{C_{nom}} \Delta t, \quad SOC_{min} \leq SOC_t \leq SOC_{max}.$$

Алгоритми EMS.

У робочому циклі EMS підтримує енергобаланс, мінімізуючи імпорт із мережі без шкоди для комфорту та ресурсу АКБ. За надлишку P_{PV} система спершу покриває поточне навантаження, далі заряджає АКБ, а потім дозволяє гнучкі споживачі (нагрів води, прання). Коли прогнозована інсоляція висока, запуск гнучких процесів зміщується до денного піку генерації; за дефіциту — гнучкі навантаження пригнічуються, критичні зберігаються, а мережа чи дозований розряд АКБ використовуються лише в межах порогів SOC_{min}, P_{lim} тарифних планів «день/ніч» або багатозонних EMS переносить енергоємні задачі в інтервали низької вартості, поєднуючи це з прогнозом $P_{PV}(t)$ для підвищення самоспоживання.

Моделювання та оцінка ефективності.

Симуляція проводиться на часовій сітці 1–5 хв із типовими профілями інсоляції та навантаження. Аналізуються частка самоспоживання PV, автономність, скорочення піків мережевого імпорту та економія за тарифами. Як показано на рис. 1, у добовому сценарії частка самоспоживання PV становить 50,4 %, автономність — 81,2 %, імпорт з мережі — 4,6 кВт·год, експорт — 16,6 кВт·год. Криві $P_{PV}(t)$, $P_{load}(t)$, $P_{grid}^{imp}(t)$ і $SOC(t)$ візуалізують «вікна» для гнучких процесів, а агреговані показники за тиждень/місяць демонструють стабільність виграшу.

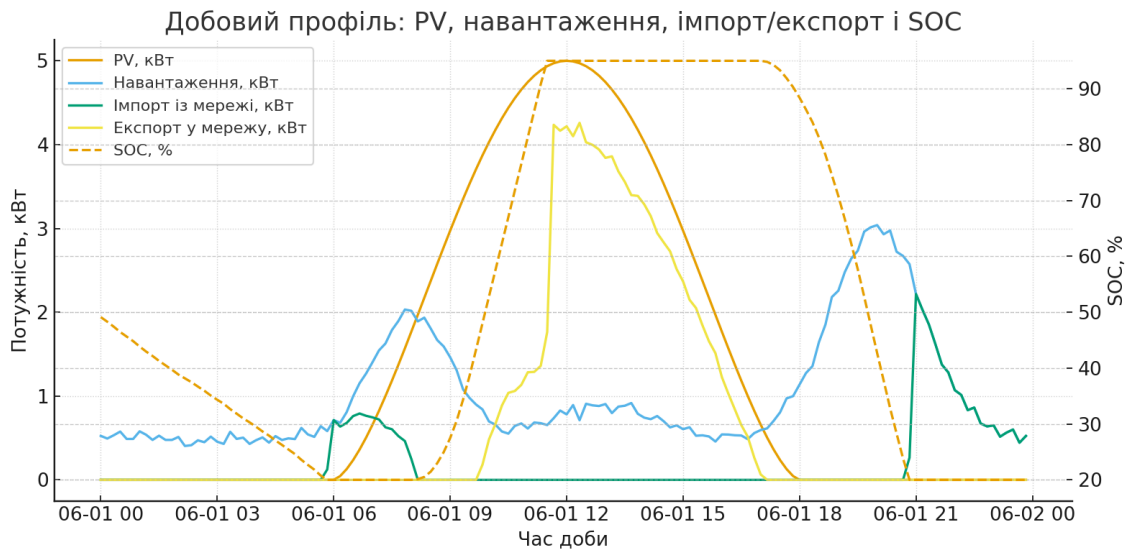


Рисунок 1 – Добовий профіль системи: PV-генерація, навантаження, імпорт/експорт у мережу та SOC акумулятора.

Надійність і безпека впровадження.

Електробезпеку забезпечують селективні автомати та ПЗВ, SPD на вводі, DC-відсікачі стрінгів і коректне заземлення; BMS контролює температуру та струми АКБ. Передбачено апаратне аварійне відключення та ручний байпас, журналювання подій, а також базовий кіберзахист (TLS, ізоляція IoT-сегмента, ролі користувачів). Архітектура дозволяє масштабування — додавання стрінгів PV, модулів АКБ чи нових груп навантажень без змін основної логіки EMS завдяки параметричним профілям.

Охорона праці та безпека

У системі є три головні ризики: електрика, постійна напруга від сонячних панелей/АКБ і тепло. Тому перше правило просте: перед будь-якими роботами все має бути знеструмлено. PV-панелі під сонцем завжди «живі», тож користуємось DC-відсікачами, не торкаємось відкритих контактів і не працюємо «під напругою». В щиті — підписані автомати, справні ПЗВ і захист від перенапруг (SPD), кабелі без «скруток», у вологих місцях — обладнання з потрібним класом захисту.

Акумулятор — окрема увага: не перегріваємо, не коротимо, не накриваємо. Корпус провітрюється, BMS контролює температуру і струми, біля батарей — вогнегасник (ABC/CO₂) і датчик диму. Якщо щось пахне горілим або модуль нагрівся незвично — негайне відключення й провітрювання, без спроб «допрацювати ще трохи».

Висновки

Запропонована архітектура «розумного будинку» з інтегрованою PV-підсистемою, акумулятором і локальним EMS забезпечує кероване споживання за пріоритетами, підвищує частку самоспоживання та зменшує імпорту і пікові навантаження з мережі без втрати побутового комфорту. Математична модель і алгоритми балансування з урахуванням SOC та тарифів демонструють керовану економію енергії й ресурсозбереження АКБ. Реалізація на поширених інтерфейсах (Modbus, MQTT) робить рішення масштабованим і сумісним, а дотримання вимог електро- та пожежної безпеки підвищує надійність експлуатації. Перспективи подальших робіт — впровадження прогнозного керування (ML), участь у сервісах гнучкості мережі та адаптація для багатоквартирних будівель.

Список використаних літератури

1. IEC 60364-7-712:2025. Low-voltage electrical installations — Part 7-712: Requirements for special installations or locations — Solar photovoltaic (PV) power supply systems. International Electrotechnical Commission, 2025.
2. IEC 62446-1:2016 + A1:2018. Photovoltaic (PV) systems — Requirements for testing, documentation and maintenance. Part 1: Grid connected systems — Documentation, commissioning tests and inspection. IEC, 2016/2018.
3. IEC 62109-1:2010. Safety of power converters for use in photovoltaic power systems — Part 1: General requirements. IEC, 2010.
4. IEC 62619:2022. Secondary lithium cells and batteries for use in industrial applications — Safety requirements. IEC, 2022.
5. Dobos, A. P. PVWatts Version 5 Manual, NREL/TP-6A20-62641, 2014. National Renewable Energy Laboratory.
6. Gilman, P. SAM Photovoltaic Model Technical Reference Update, NREL/TP-6A20-67399, 2018. National Renewable Energy Laboratory.
7. Beaudin, M., Zareipour, H., Schellenberg, A., Rosehart, W. Home energy management systems: A review of modelling and complexity. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 45, 318–335, 2015.
8. Azuatalam, D., Paridari, K., Ma, Y., Förstl, M., Chapman, A. C., Verbič, G. Energy management of small-scale PV-battery systems: A systematic review... Renewable & Sustainable Energy Reviews, 112, 555–570, 2019.
9. Mascherbauer, P., et al. Investigating the Impact of Smart Energy Management System on the Residential Electricity Consumption in Austria, Fraunhofer ISI, 2022.
10. Liao, W., et al. A comparative study of demand-side energy management strategies for grid-connected PV-battery systems. Applied Energy, 2024.
11. Hussain, M. M., et al. Demand-Side Management Techniques for Home Energy Management Systems. Sustainability, 13(21), 11740, 2021.
12. NREL. PVWatts V8 — API & Model description (latest). National Renewable Energy Laboratory, 2024–2025.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТУ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ СИПКОГО ПАЛИВА

Вступ. Зернисті, сипкі та волокнисті матеріали відіграють важливу роль у господарській діяльності сучасної людини. Після переробки сільськогосподарської продукції та деревини утворюється значна кількість лігноцелюлозних решток у вигляді сипкої маси. Для розробки, проектування та подальшої експлуатації вакуумної піролізної системи, яка призначена для переробки відходів сільськогосподарської продукції у корисні хімічні речовини, необхідно володіти комплексною та достовірною інформацією про фізико-технічні властивості біоматеріалів у сипкому стані, а саме коефіцієнти температуропровідності, тепловіддачі та теплопровідності [1].

Мета та завдання. Метою даного дослідження є експериментальне визначення коефіцієнту теплопровідності сипкого палива рослинного походження.

Матеріал та результати дослідження. Дослідження включало в себе аналіз методів і приладів для вимірювання теплофізичних властивостей різних речовин: імпульсних, регулярних та квазістаціонарних [2]. При цьому було визначено, що попри велике розмаїття методів вимірювання теплопровідності, їх можна умовно розділити на дві основні групи: стаціонарні й нестаціонарні. На відміну від стаціонарних методів, нестаціонарні характеризуються меншою тривалістю експерименту, спрощеною організацією дослідницьких процедур і високим рівнем автоматизації під час збору та обробки отриманих даних.

Для оцінки коефіцієнту теплопровідності був обраний метод, який забезпечує можливість проводити вимірювання в регулярному режимі. Регулярний тепловий режим визначався як етап процесу, коли просторово-часові зміни температури більше не залежать від початкових умов і переходять до стабільного стану.

Постійний темп охолодження m є однією з ключових ознак регулярного теплового режиму ϵ , який залишається однаковим для всіх точок тіла і не залежить від того, як розподілялася температура на початковому етапі.

Принципи цього методу було покладено у розроблену експериментальну установку, основним елементом якої є λ -калориметр у вигляді циліндрового тонкостінного металевого стакану із кришкою, всередині якого розміщувався дослідний зразок. Метод визначення коефіцієнта теплопровідності полягав у охолодженні λ -калориметру, попередньо нагрітого у сушильній шафі, у середовищі зі сталою температурою.

На початку дослідів λ -калориметр заповнювали сипким паливом відповідної маси і нагрівали у сушильній шафі до температури 70 ... 80 °С. Після нагріву його діставали з шафи, закріплювали у штативі і розташовували у центрі калориметру гарячий спай диференційної термопари, а холодний спай у пробірці з олією, що має сталу температуру, яка дорівнює температурі навколишнього середовища. Кожні 30 секунд проводили виміри термоЕРС термопари, підключену до мілівольтметра. Надлишкову температуру визначали за термоЕРС мідь-константової термопари. Тривалість кожного експерименту з урахуванням першої стадії охолодження у вигляді іррегулярного режиму становила 20 хв.

Об'єктом дослідження були відходи зернопереробних виробництв різного рівня подрібнення, зокрема лущиння соняшника, лузга гречки, ячмінна лузга та лузга спельти.

Було проведено серію дослідів по визначенню насипної густини. Для цього використовували контейнер циліндричної форми з внутрішнім об'ємом 0,005 м³, тарировку якого проводили з використанням дистильованої води при температурі 20 °С. Насипну густину розраховували виходячи з маси нетто і внутрішнього об'єму контейнера.

Розрахована величина стосується палива з вмістом води, рівним вмісту води випробуваної проби. За остаточний результат приймали середнє арифметичне значення результатів паралельних випробувань. Значення насипної густини знаходилося у діапазоні від 120 до 180 кг/м³ для всіх зразків.

Коефіцієнт теплопровідності λ сипкого палива визначали за допомогою двоскладового λ -калориметру. При цьому в ході розрахунків використовували результати попередніх вимірів коефіцієнта температуропровідності a [3]. Для забезпечення відтворюваності результатів усі описані експерименти було проведено тричі.

В результаті експериментального визначення коефіцієнту теплопровідності λ сипкого матеріалу рослинного походження було отримано наступні дані: для лушпиння соняшника $\lambda = 0,042$ Вт/мК, для лузги гречки $\lambda = 0,047$ Вт/мК, для лузги ячмінної $\lambda = 0,052$ Вт/мК, для лузги спельти $\lambda = 0,038$ Вт/мК.

Наявність похибки вимірювання температури обумовлюється градувальною похибкою мідь-константової термопари, а також впливом залишкових систематичних погіршень, які не були усунуті під час проведення вимірювань.

Показано, що при розрахунках коефіцієнту теплопровідності визначалися з урахуванням поправки на оболонку калориметра. Встановлено темп охолодження для кожного з матеріалів. Отримані результати експериментальних досліджень коефіцієнту теплопровідності сипких матеріалів рослинного походження було визначено з урахуванням відносної похибки.

Висновки. Створено експериментальну установку для визначення коефіцієнту теплопровідності сипкого матеріалу рослинного походження. Застосований метод регулярного режиму першого роду λ -калориметру найзручніший для визначення коефіцієнту теплопровідності гетерогенних матеріалів. Проведено серію експериментів по визначенню коефіцієнту теплопровідності насипної біомаси. Отримано експериментальні дані коефіцієнту теплопровідності сипкого біопалива, а саме: лушпиння соняшника, лузги гречки, лузги ячменю і лузги спельти. Виконано аналіз похибок експериментальних даних. Встановлено, що основний внесок у повну похибку робить її випадкова складова.

Список використаних джерел

1. Suuberg E., Aarna I., Milosavljevic I. The char residues from pyrolysis of biomass—some physical properties of importance. *Progress in Thermochemical Biomass Conversion*, IEA Bioenergy, vol. 2. UK: Blackwell Science Ltd; 2001. p. 1246–58.
2. Alaili K., Ordonez-Miranda J., Ezzahri Y. Simultaneous determination of thermal diffusivity and thermal conductivity of a thin layer using double modulated thermal excitations // *Journal of Applied Physics*. 2019. Vol. 126. No. 14. Article 145103.
3. Волчок В.О., Нікітін Д.М. Експериментальне визначення коефіцієнту температуропровідності гетерогенної системи // *Холодильна техніка та технологія*. – 2024. – Том 60. - №4. – с. 266 – 274. DOI <https://doi.org/10.15673/ret.v60i4.3052>

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТРИГЕНЕРАЦІЙНИХ СИСТЕМ З КОМПРЕСОРНИМИ ТЕПЛОВИКОРИСТАЛЬНИМИ ХОЛОДИЛЬНИМИ МАШИНАМИ

У тригенераційних системах здійснюється одночасне вироблення електричної енергії, теплоти та холоду, що дає змогу суттєво підвищити загальну енергетичну ефективність. Традиційно в таких системах застосовують абсорбційні холодильні машини [1], однак їхня продуктивність істотно залежить від наявного температурного режиму, що природньо обмежує ефективність роботи тригенераційної системи.

У даній роботі проаналізовано можливість ретрофіту традиційних абсорбційних холодильних машин у складі тригенераційних комплексів на компресорну тепловикористальну холодильну установку на R744 [2] (рисунок 1а), що застосовує регенерацію теплоти (рисунок 1 б, в, г) для отримання холоду при від'ємних температурах.

Регенерація теплоти є важливим напрямом підвищення ефективності сучасних енергоперетворювальних систем. Використання регенерації в циклах прямого типу дає змогу зменшити кількість підведеного від зовнішнього джерела тепла, а у зворотних циклах регенерація сприяє підвищенню холодопродуктивності, а також покращенню експлуатаційної надійності компресорного обладнання.

Для проведення термодинамічного аналізу процесу регенерації теплоти авторами було розглянуто три варіанти можливих схемних рішень систем регенерації: регенерація теплоти у зворотному циклі РТО1 (рисунок 1б), регенерація теплоти у прямому циклі РТО2 (рисунок 1в) та перехресна регенерація теплоти РТО3 (рисунок 1г).

Під час аналізу було прийнято такі вихідні параметри: максимальна температура робочої речовини в газовому нагрівачі — 250 °С; тиск робочої речовини в газовому нагрівачі — 200 бар; тиск робочої речовини в газовому охолоджувачі — 75 бар; мінімальна температура в газовому охолоджувачі — 30 °С; температура кипіння — -25 °С. Ефективність турбіни становила 85%, насоса — 90%, компресора — 80%, електродвигуна — 95%, електрогенератора — 95%. Розрахункова холодопродуктивність установки становила 100 кВт.

Важливо зазначити, що аналіз проводився для нижчих температур отримання холоду порівняно з абсорбційними холодильними машинами, що апіорі забезпечує розширення робочого діапазону отримання холоду.

Таким чином, шляхом термодинамічного аналізу встановлено, що для еталонного схемного рішення значення COP становить 0,20. При використанні регенерації теплоти у зворотному циклі (РТО1) суттєвого приросту енергетичної ефективності не спостерігається — COP підвищується лише до 0,23 (рисунок 2). Натомість застосування перехресної регенерації теплоти (РТО3) дозволяє збільшити COP до 0,313.

На наступному етапі досліджень авторами була здійснена оцінка ефективності впровадження гібридного (одночасного) застосування кількох способів регенерації теплоти. Максимальний приріст енергетичної ефективності спостерігався при комбінуванні схем РТО3 та РТО1, коли значення COP сягало 0,41.

Таким чином, запропонований підхід до реалізації систем тригенерації є перспективною альтернативою існуючим технологіям і може слугувати основою для подальшого розвитку енергоефективних та екологічно безпечних систем перетворення енергії.

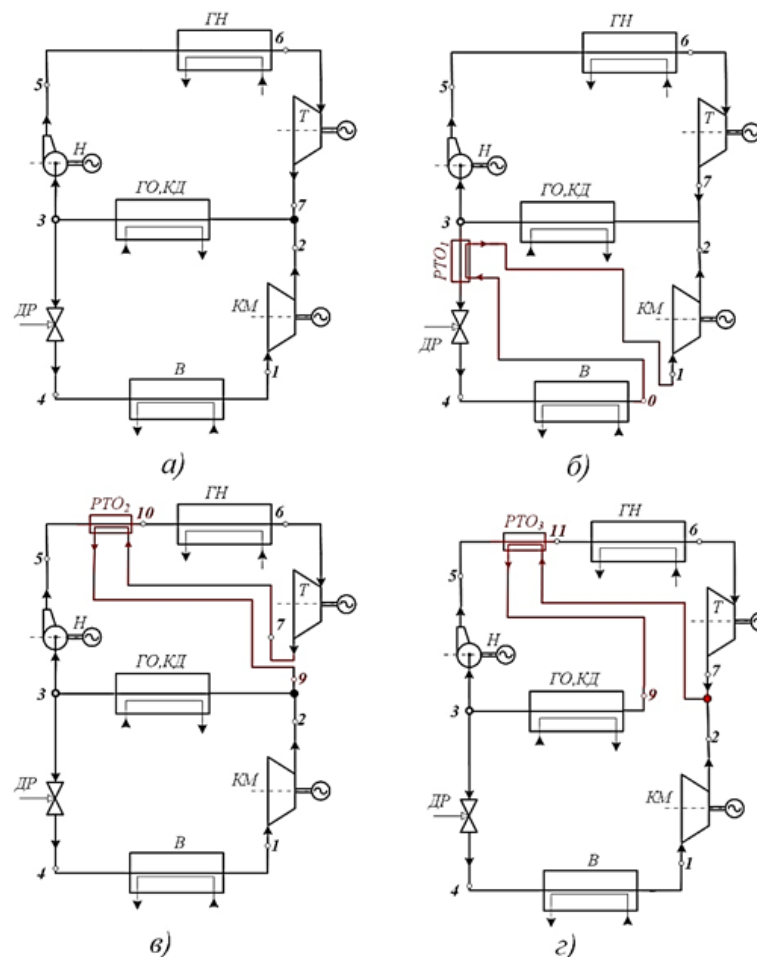


Рисунок 1 – Схемні рішення для теловикористальної компресорної холодильної машини з R744:
а - еталонна схема, б - регенерація теплоти у зворотному циклі, в - регенерація теплоти у прямому циклі, г - перехресна регенерація теплоти.

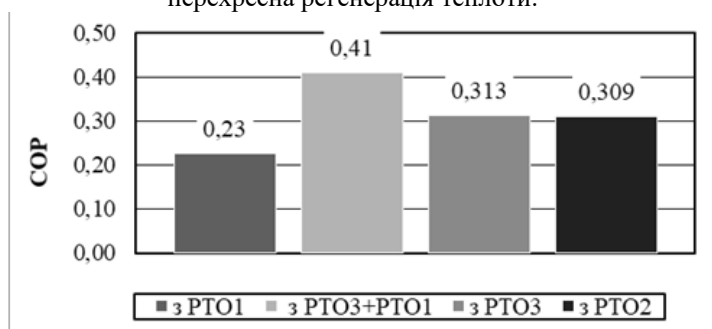


Рисунок 2 – COP для схемних рішень з регенерацією теплоти.

Список використаних джерел

1. Ametta, M.; Maggio, G.; Vasta, S. Thermodynamic Evaluation of the Potential of a Sorption Storage System for Renewables and Waste Heat Integration. Appl. Sci. 2025, 15, 1951. <https://doi.org/10.3390/app15041951>
2. Morozuk, L. I., & Haiduk, S. V. (2012). Komresorna teplovykorystalna kholodylna mashyna [UA Patent No. 72660]. Ukrainian Intellectual Property Institute.

СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ТА ДІАГНОСТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ

Анотаці Робота спрямована на розробку системи моніторингу та діагностування ефективності роботи сонячних панелей. Обґрунтовано актуальність створення інтегрованої системи збору, аналізу та візуалізації експлуатаційних параметрів, яка дозволяє оцінювати технічний стан фотоелектричних модулів, прогнозувати деградаційні процеси та своєчасно виявляти відхилення від номінальних характеристик. Розглянуто основні параметри, що впливають на ефективність роботи сонячних панелей: інтенсивність сонячного випромінювання, температура, струм, напруга, потужність і коефіцієнт корисної дії. Запропоновано структурну схему апаратно-програмного комплексу моніторингу, методика аналізу даних і критерії оцінювання ефективності роботи системи.

Ключові слова: сонячна енергетика, фотоелектричні панелі, моніторинг, ефективність, діагностика, інформаційна система.

Annotation The work is aimed at developing a system for monitoring and diagnosing the efficiency of solar panels. The relevance of creating an integrated system for collecting, analysing and visualising operational parameters is justified, which allows assessing the technical condition of photovoltaic modules, predicting degradation processes and timely detecting deviations from nominal characteristics. The main parameters affecting the efficiency of solar panels are considered: solar radiation intensity, temperature, current, voltage, power and efficiency. A structural diagram of the hardware and software monitoring complex, a data analysis methodology and criteria for evaluating the efficiency of the system are proposed.

Keywords: solar energy, photovoltaic panels, monitoring, efficiency, diagnostics, information system.

Вступ. Перехід до відновлюваних джерел енергії є ключовим завданням сучасного енергетичного сектору. Серед різних видів альтернативної енергетики саме сонячна енергія демонструє найвищі темпи розвитку завдяки екологічній чистоті, модульності та відносно низьким експлуатаційним витратам. Проте ефективність роботи фотоелектричних систем значною мірою залежить від зовнішніх умов і технічного стану елементів системи. З плином часу сонячні панелі втрачають частину своєї потужності через деградацію матеріалів, старіння з'єднань і вплив погодних факторів. Крім того, порушення роботи інверторів, контролерів або забруднення поверхні модулів може істотно знизити виробіток енергії. У зв'язку з цим актуальним завданням є створення інтелектуальних систем моніторингу, здатних не лише реєструвати показники роботи панелей, а й проводити аналітичну обробку даних для виявлення тенденцій та прогнозування ефективності.

Мета та завдання досліджень

Метою роботи є розробка системи моніторингу та діагностування ефективності роботи сонячних панелей на основі аналізу експлуатаційних параметрів. Для досягнення поставленої мети визначено такі завдання. Ознайомитися з сучасними методами та засобами контролю стану фотоелектричних систем. Систематизувати дані про технічні характеристики сонячних панелей, інверторів, контролерів та допоміжного обладнання. Визначити параметри, що впливають на ефективність роботи панелей: інсоляція, температура, струм, напруга, потужність, ККД. Проаналізувати існуючі апаратно-програмні рішення для моніторингу та діагностування сонячних установок. Розробити структуру інформаційної моделі для збору, збереження, обробки та аналізу даних. Сформулювати критерії ефективності та показники для діагностики технічного стану панелей. Сформулювати технічні вимоги до майбутньої системи моніторингу.

Матеріал та результати досліджень

Функціонування фотоелектричних модулів базується на перетворенні енергії сонячного випромінювання у електричну за рахунок фотоефекту у напівпровідникових матеріалах. Основними параметрами, що характеризують роботу панелі, є:

Інсоляція (G) — потужність сонячного випромінювання, що падає на поверхню панелі, Вт/м².

Температура осередку (T) — безпосередньо впливає на напругу та ККД перетворення.

Струм (I) та напруга (U) — основні електричні параметри, що дозволяють розрахувати потужність

Коефіцієнт заповнення (FF) — показник якості фотоелектричного перетворення.

Коефіцієнт корисної дії (η) — співвідношення між вихідною електричною потужністю та потужністю сонячного випромінювання.

Під час моніторингу необхідно враховувати зміну цих параметрів у реальному часі. Для цього застосовують датчики інсоляції, термодатчики, амперметри, вольтметри, лічильники енергії та контролери збору даних.

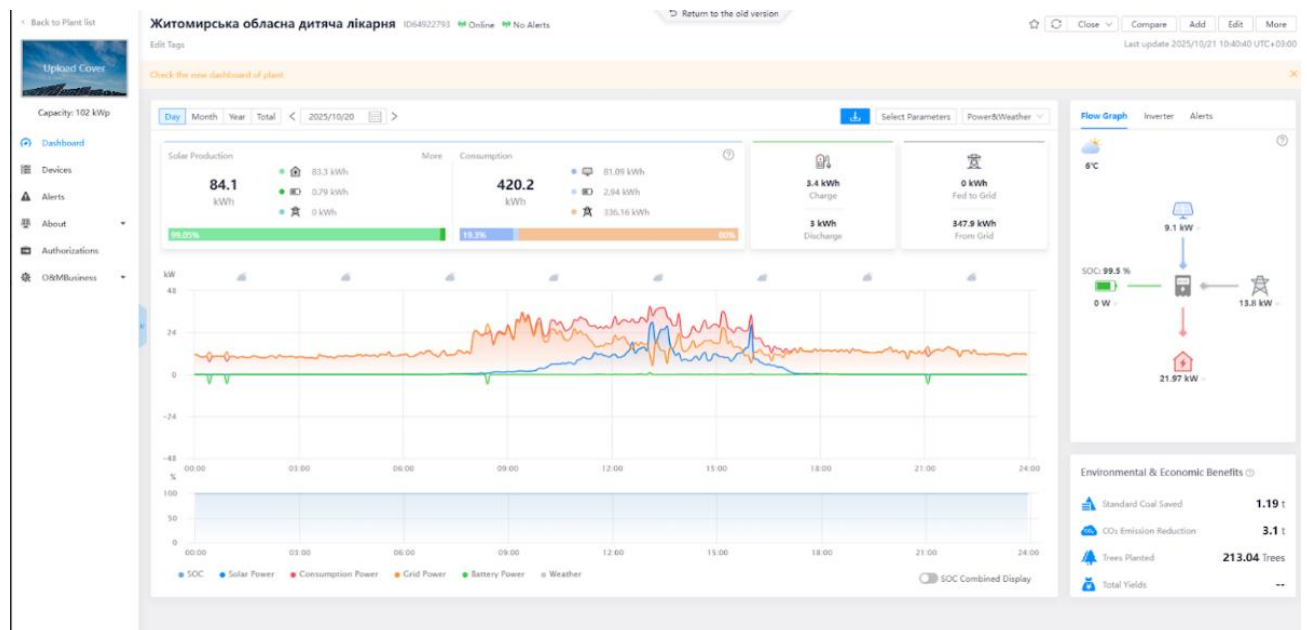


Рис. 1 - Візуалізація додатку існуючої системи моніторингу

Апаратна та програмна архітектура системи моніторингу

Фізичний рівень. Включає датчики температури, освітленості, струму та напруги. Дані зчитуються мікроконтролером, який забезпечує попередню фільтрацію сигналів. **Комунікаційний рівень.** Передача інформації здійснюється за допомогою протоколів Modbus, RS-485 або бездротових технологій (LoRa, Wi-Fi, GSM). **Серверний рівень.** Дані надходять до центрального сервера або хмарного сховища, де зберігаються в базі даних (наприклад, SQL). **Аналітичний рівень.** Реалізує алгоритми обробки даних, виявлення аномалій, порівняння фактичних та розрахункових значень потужності. **Інтерфейс користувача.** Забезпечує візуалізацію даних у вигляді графіків, таблиць, індикаторів ефективності та попереджень про відхилення від норми. Впровадження такої архітектури дає можливість інтегрувати систему з існуючими енергетичними платформами та розширювати її функціонал у майбутньому. Виявлення несправностей здійснюється шляхом порівняння реальних показників із еталонними або статистичною моделлю роботи системи. Найпоширенішими причинами зниження ефективності є:

- часткове затінення панелей;
- забруднення поверхні;
- пошкодження фотоелементів;

- вихід з ладу діодів або контактів;
- деградація внаслідок тривалого термічного впливу.

Своєчасна діагностика дозволяє запобігти втратам енергії до 10–15 % на рік.

Запропонована система моніторингу має багаторівневу структуру:

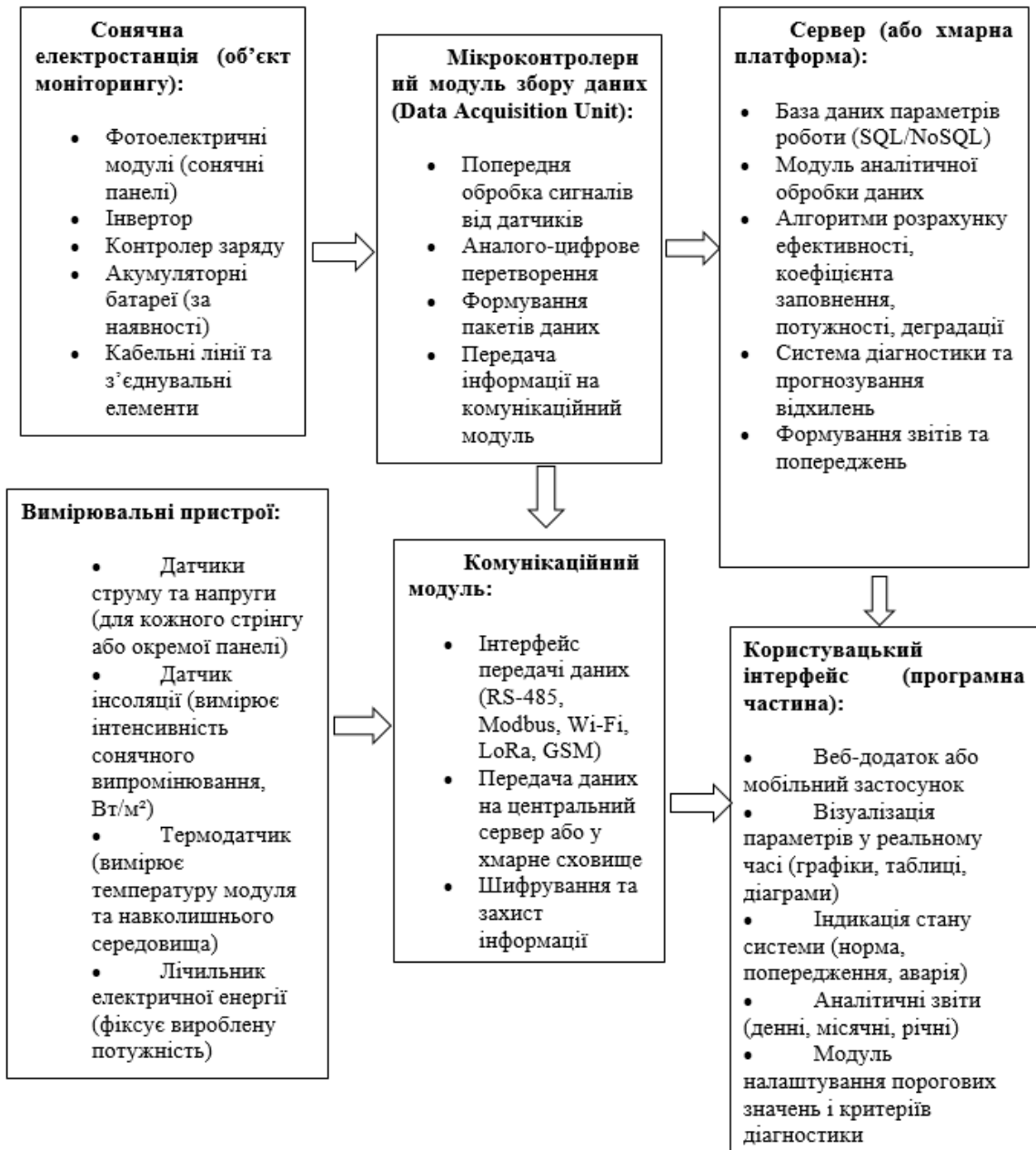


Рис. 2 - Структурна схема апаратно-програмного комплексу моніторингу та діагностування ефективності роботи сонячних панелей

Розроблена модель системи моніторингу передбачає встановлення сенсорного вузла на кожному стрінгу панелей та передачу даних до центрального контролера. Обробка інформації здійснюється в автоматичному режимі з фіксацією поточних і середньодобових значень потужності, напруги та температури. Система може надсилати повідомлення користувачу у разі перевищення критичних порогів або відхилення ефективності від розрахункової більш ніж на 10 %. Для зручності користувачів передбачено веб-інтерфейс або мобільний додаток, який відображає графіки продуктивності, журнал подій, аналітику за періодами та рекомендації щодо обслуговування панелей

Висновки

У результаті проведеного дослідження було обґрунтовано необхідність впровадження систем моніторингу для підвищення ефективності експлуатації фотоелектричних установок. Визначено ключові параметри, що впливають на продуктивність сонячних панелей, та сформовано вимоги до їх безперервного контролю. У роботі розроблено архітектуру апаратно-програмного комплексу моніторингу, який забезпечує автоматизований збір, аналіз і візуалізацію даних про роботу сонячних панелей. Запропоновано методику діагностування технічного стану фотоелектричних модулів на основі порівняння фактичних і розрахункових параметрів, що дозволяє оперативно виявляти відхилення в роботі системи. Встановлено, що впровадження розробленої системи сприяє підвищенню точності виявлення дефектів, оптимізації технічного обслуговування та зменшенню експлуатаційних витрат без потреби у значних фінансових інвестиціях. Подальші дослідження плануються спрямувати на створення алгоритмів інтелектуального прогнозування деградації сонячних панелей і впровадження технологій машинного навчання для автоматичного виявлення несправностей, що дозволить ще більше підвищити надійність та ефективність роботи фотоелектричних систем.

Список використаних джерел

1. SolarEdge Technologies. Monitoring Platform Overview. – Access mode: <https://www.solaredge.com/>
2. National Renewable Energy Laboratory (NREL). PV Performance Data Sets. – Access mode: <https://www.nrel.gov/>
3. Fronius SolarWeb. Online Monitoring Portal. – Access mode: <https://www.solarweb.com/>
4. Калінін О. В. Системи моніторингу ефективності фотоелектричних установок. – Київ: КПІ ім. І. Сікорського, 2022. – 88 с.
5. Чуканов С. Ю., Попович В. Г. Методи діагностування фотоелектричних систем. – Львів: ЛНТУ, 2023. – 102 с.
6. Коваль А. В. Технічна діагностика енергетичних систем. – Харків: НТУ «ХПІ», 2021. – 156 с.
7. Li X., Zhao Y. Solar Panel Performance Monitoring Systems: A Review. Renewable Energy Journal, 2023, Vol. 189, pp. 245–261.

ЗАСТОСУВАННЯ МАШИННОГО НАВЧАННЯ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ПОПИТУ НА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЮ В SMART GRIDS

Сучасні енергосистеми переживають значну трансформацію, рухаючись до моделі Smart Grid (розумної мережі). Це спричинено децентралізацією генерації, масовою інтеграцією відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) та необхідністю обробки великих обсягів (Big Data) високочастотних даних. Неточне прогнозування попиту в таких динамічних умовах призводить до значних економічних втрат, зростання операційних витрат і ризику нестабільності системи. Традиційні статистичні моделі (наприклад, ARIMA) є неефективними для аналізу складних, нелінійних залежностей, що виникають в сучасних Smart Grids. Отже, постає завдання розробки та дослідження передових методів, зокрема Машинного Навчання (МН), для значного підвищення точності короткострокового прогнозування попиту [1 – 3].

Метою роботи є розробка та експериментальне підтвердження ефективності моделі Довгої Короткочасної Пам'яті (LSTM) для високоточного короткострокового прогнозування попиту на електроенергію в Smart Grids з використанням високочастотних даних та інтеграцією ключових зовнішніх чинників.

LSTM є різновидом рекурентної нейронної мережі, спеціально розробленої для роботи з часовими рядами та подолання проблеми зникаючого градієнта. Модель використовує комірки пам'яті, що дозволяють їй вибірково зберігати інформацію протягом тривалих часових проміжків, що ідеально підходить для прогнозування попиту на електроенергію, де споживання залежить від факторів, що діяли дні, тижні або місяці тому. LSTM забезпечує високу точність короткострокового прогнозування (кілька годин або доба), необхідну для критичних операцій в Smart Grids [4-5]. Результати моделювання підтвердили перевагу глибокого навчання у складних умовах Smart Grids.

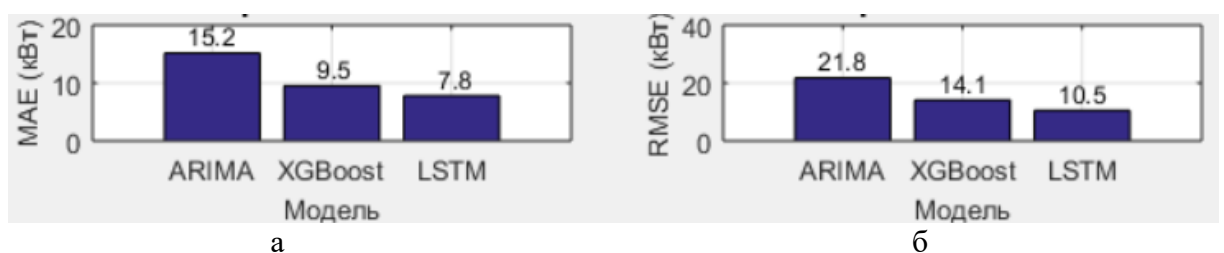


Рисунок 1 – Порівняння значень MAE для моделей: ARIMA, XGBoost та LSTM (а); Порівняння значень RMSE для моделей: ARIMA, XGBoost та LSTM (б)

На рис. 1 показано порівняння точності прогнозування різних моделей за метриками MAE (середня абсолютна похибка) та RMSE (середньоквадратична похибка). Модель LSTM демонструє найвищу точність із найнижчими значеннями MAE (7.8 кВт) та RMSE (10.5 кВт), що підтверджує її ефективність у захопленні складних нелінійних залежностей у часових рядах. XGBoost також значно перевершує традиційну модель ARIMA завдяки ефективному використанню зовнішніх ознак (погода, календар). Застосування LSTM дозволяє мінімізувати операційні ризики та витрати, пов'язані з неточним прогнозуванням попиту на електроенергію в Smart Grids.

Графік на рис. 2 демонструє високу якість моделі LSTM. Червона пунктирна лінія (прогноз) щільно накладається на синю лінію (фактичний попит) протягом усіх 48

інтервалів, точно відтворюючи підйоми та спади попиту. Модель успішно вловлює добову циклічність споживання, що критично важливо для оперативного прийняття рішень (включення резервних потужностей) та ефективного балансування мережі в Smart Grids.

Діаграма розсіювання залишків (рис. 3) показує, що похибки моделі розподілені випадково навколо нульової лінії без чітких закономірностей, що свідчить про надійність та узагальнюючу здатність LSTM. Більшість точок згруповані близько до нуля, підтверджуючи низьке значення MAE і рідкісність великих похибок. Рівномірний розподіл залишків дозволяє впевнено використовувати прогнози LSTM для автоматизованого управління мережею.

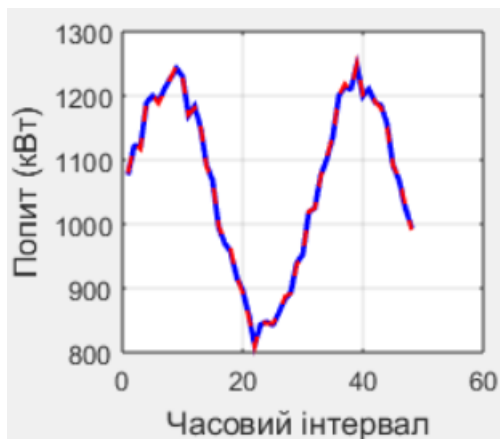


Рисунок 2 – Прогноз попиту на електроенергію (48 інтервалів)

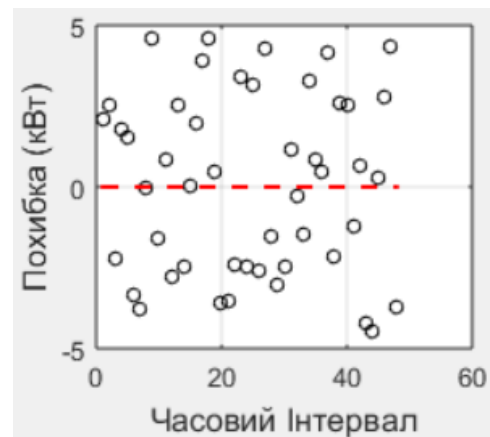


Рисунок 3 – Діаграма розсіювання залишків LSTM

Висновок. Дослідження підтвердило, що модель LSTM є найефективнішим методом короткострокового прогнозування попиту на електроенергію в Smart Grids. LSTM забезпечує зниження похибки на 20-50% порівняно з традиційними моделями, успішно моделює складну динаміку часового ряду без систематичних похибок, що робить її оптимальною для автоматизованого прийняття рішень. Високоточні прогнози LSTM призводять до мінімізації операційних витрат, оптимізації керування накопичувачами енергії та підвищення надійності енергосистеми.

Список використаної літератури

1. Nayyef, Z. T., Abdulrahman, M. M., Kurdi, N. A. (2024). Optimizing Energy Efficiency in Smart Grids Using Machine Learning Algorithms: A Case Study in Electrical Engineering. *SHIFRA*, 2024, 46-54. <https://doi.org/10.70470/SHIFRA/2024/006>
2. Hossain, A., Ridoy, M. H., Chowdhury, B. R., Hossain, M. N., Rabbi, M. N. S., Ahad, M. A., Jakir, T., Hasan, M. S. (2024). Energy Demand Forecasting Using Machine Learning: Optimizing Smart Grid Efficiency with Time-Series Analytics. *Journal of Environmental and Agricultural Studies*, 5(1), 26-42. <https://doi.org/10.32996/jeas.2024.5.1.4>
3. Лободзинський В.Ю., Бурик М.П., Петрученко О.В., Ілліна О.О. (2022) Вплив системи smart grid на національну енергетичну мережу. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. № 1, 57–64. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.1.2022.259182>
4. Majeed, M. A., Phichaisawat, S., Asghar, F., & Hussan, U. (2025). Data-Driven Optimized Load Forecasting: An LSTM Based RNN Approach for Smart Grids. *IEEE Access*. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3576303>
5. Palaniyappan, B., & Ramu, S. K. (2025). Optimized LSTM-based electric power consumption forecasting for dynamic electricity pricing in demand response scheme of smart grid. *Results in Engineering*, 25, 104356. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104356>

СТРИБКИ ФАЗОВОГО КУТА В ЕЛЕКТРИЧНІЙ МЕРЕЖІ

Вступ Стрибки фазового кута є одним із критичних явищ в електроенергетичних системах, що виникають під час аварійних або перехідних процесів. Це миттєві різкі зміни кута між напругою та струмом, які впливають на роботу синхронізованих перетворювачів, генераторів та систем релейного захисту.

Мета роботи. Метою роботи є аналіз причин виникнення стрибків фазового кута, дослідження їх впливу на електроенергетичні системи та визначення методів мінімізації негативних наслідків.

Матеріали та результати

Стрибки фазового кута виникають унаслідок коротких замикань, різких змін навантаження або перемикання елементів мережі. Величина стрибка визначається співвідношенням X/R у пошкодженій ділянці мережі. Чим більше реактивний опір, тим значнішим буде кутовий зсув.

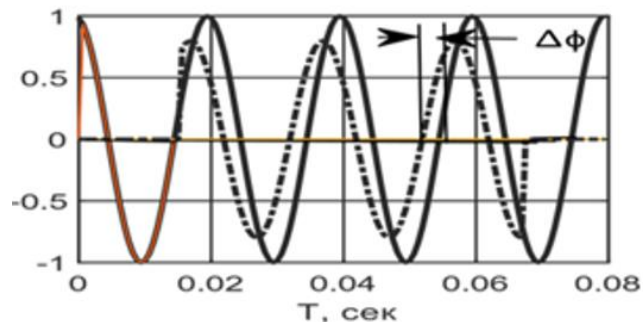


Рисунок 1. Просідання напруги

Коли відбувається аварія в електромережі, відбуваються два основні процеси. По-перше, відбувається різке зниження напруги (sag), яке проявляється як зниження амплітуди синусоїди. По-друге, відбувається стрибок фазового кута — зміщення фази сигналу на певний кут, у цьому конкретному випадку приблизно на $+25^\circ$. Цей стрибок проявляється зсувом максимумів і нульових переходів відносно початкової хвилі.

Фазовий стрибок дуже важливий для роботи обладнання, оскільки він порушує синхронізацію перетворювачів, PLL-систем і генераторів. Це може призвести до нестабільності, помилкових спрацьовувань релейного захисту або навіть відключення інверторів. Осцилограма показує, як аварія впливає на амплітуду та фазу напруги одночасно, що робить аналіз обох параметрів необхідним для оцінки стійкості енергосистеми.

Дослідження показують, що стрибки фазового кута можуть досягати $10\text{--}40^\circ$. Вони викликають порушення синхронізації інверторів, збільшення гармонік та перевантаження електронних систем, особливо у вітроенергетичних установках типу DFIG.

Для моделювання радіальної мережі застосовано схему з параметрами Z_s та Z_f . Результати підтверджують, що глибина аварії та розташування пошкодження впливають на амплітуду стрибка. Для компенсації використовують швидкі PLL, адаптивні фільтри та алгоритми прогнозування фазових збурень.

Точка на хвилі початку спаду — це фазовий кут основної хвилі напруги, у момент якого виникає коротке замикання і починається спад напруги. Для визначення цієї точки за еталон зазвичай приймається перехід основної напруги через нуль у верхньому напрямку.

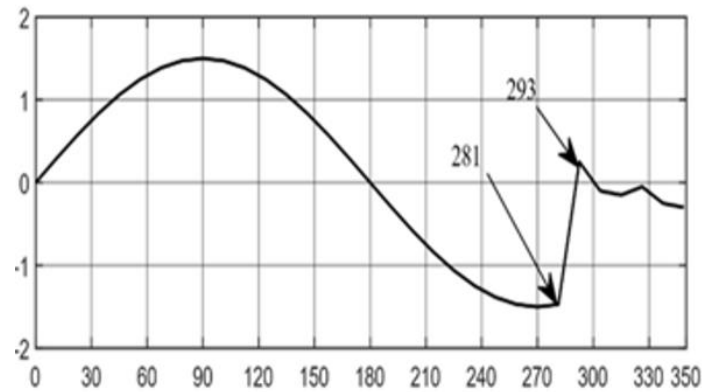


Рисунок 2. Характеристика точок на хвилі провалу напруги

На наведеному графіку точка початку спаду (або точка на хвилі початку провисання) розташована поблизу пікового значення хвилі напруги. Точка відновлення напруги — це фазовий кут, при якому напруга повертається до 90–95 % від свого номінального значення.

На графіку точка початку хвилі провисання знаходиться між 281° і 293° . Визначення стрибка фазового кута та точної точки хвилі провисання дозволяє зменшити похибку визначення параметрів аварійних режимів в електричних мережах до 1,5 %.

Метод визначення значень точок на формі сигналу напруги при наявності провалу напруги

$$U_i = U_m \times \sin(\theta)$$

U_i — миттєва напруга

$\theta = \omega t$ — фазовий кут

$\omega = 2\pi f$ — кутова частота

U_m — амплітуда основної (не спотвореної) напруги.

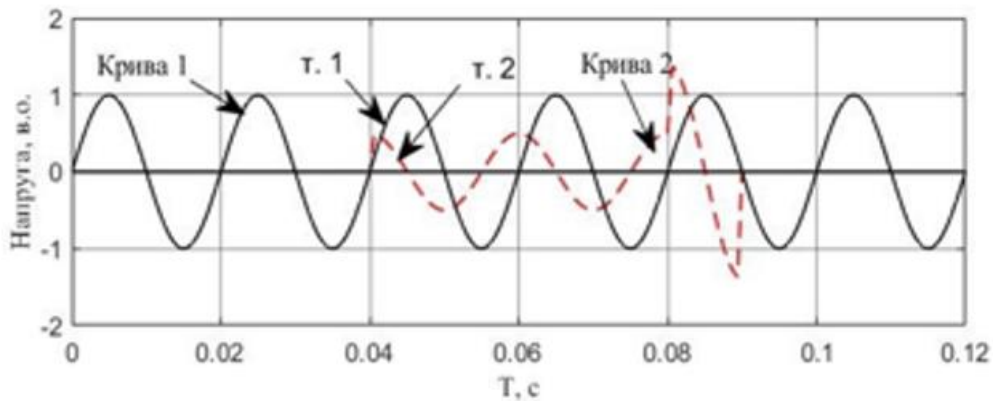


Рисунок 3. Характеристика точок на хвилі провалу напруг

Крива 1 — ідеальна напруга без провалу,

Крива 2 — реальна напруга зі стрибком і спадом,

t. 1, t. 2 — фазові кути, що відповідають початку порушення та моменту максимального відхилення.

Вважається, що миттєва напруга у момент початку спаду (точка провалу) відповідає фазовому куту основної хвилі. Тому фазовий кут початку провалу визначається:

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{U_i}{U_m}\right)$$

Алгоритм пошуку моменту початку провалу напруги порівнює значення напруги зараз з еталонною синусоїдою основного рівня. У цьому випадку використовується основне рівняння змінної напруги:

$\delta t = \varphi_a - \varphi_{sh}$
Стрибок фазового кута у векторній формі:
 $\delta f = \varphi_a - \varphi_{sh}$

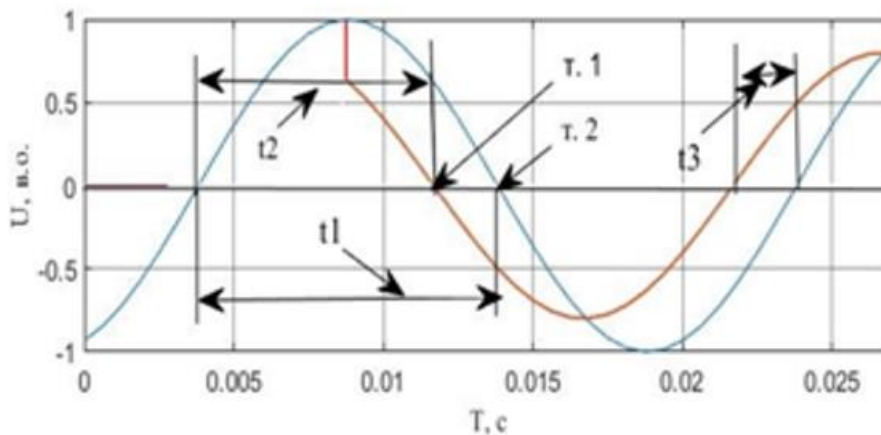


Рисунок4. Графік перетину нульового рівня для визначення фазового зсуву

t.1 та t.2 — точки перетину нульового рівня реального сигналу та шаблону;
t1, t2 — півперіоди реального сигналу та шаблону відповідно;
t3 — різниця фазових кутів.

Таблиця 1. Методи вимірювання стрибків фазового кута

Метод	Формула / Принцип	Пояснення
Метод перетину нуля	$\Delta t = t_{\text{після}} - t_{\text{до}}$ $\Delta \varphi = \omega \cdot \Delta t$	Зміна часу між переходами через нуль.
FFT-метод	$\varphi = \arctan(\text{Im}(U)/\text{Re}(U))$	Фаза з комплексної форми сигналу.
PLL	$\Delta \varphi = \theta_{\text{до}} - \theta_{\text{після}}$	Різниця фазових кутів PLL.
Симетричні складові	$U_1 = 1/3 (U_a + a U_b + a^2 U_c)$	Оцінка фази позитивної послідовності.

Висновки

Динамічна стійкість мережі визначається швидкостями фазового кута. Вони негативно впливають на роботу перетворювачів і генераторів. Покращені алгоритми PLL, системи захисту та адаптивні методи керування повинні бути введені, щоб зменшити їхній вплив..

Список використаних джерел

1. Bollen M. H. J. *Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions*. – IEEE Press, 2000.
2. Дуган Р., МакГранаган М., Бітті Г. *Якість електроенергії в електричних системах*. – McGraw-Hill, 2012.
3. IEEE Std 1159-2019. *Рекомендована практика моніторингу якості електроенергії*. – Інститут інженерів з електротехніки та електроніки (IEEE), 2019.
4. Rodriguez P., Luna A., Candela I. *Методи синхронізації перетворювачів в умовах стрибків фазового кута* // IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011.
5. Xia Y. *Вплив стрибків фазового кута на роботу DFIG-вінтроустановок* // IEEE Transactions on Energy Conversion, 2015.
6. Синявський І. В. *Електричні системи та мережі*. – КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018.

**ЦИФРОВІ МЕТОДИ МОНІТОРИНГУ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ НАДІЙНОСТІ
СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ КОМУНАЛЬНО-ПОБУТОВИХ ОБ'ЄКТІВ НА
ОСНОВІ АЛГОРИТМУ RANDOM FOREST**

Вступ. Активна цифровізація енергетичних систем зумовлює потребу переходу від реактивного контролю до прогностного управління надійністю. Для комунально-побутових об'єктів – насосних станцій, гуртожитків, лікарень – перерви електропостачання залишаються критичними, а класичні показники SAIDI, SAIFI, CAIDI лише фіксують наслідки відмов. Застосування методів машинного навчання (machine learning), зокрема алгоритму Random Forest (RF), відкриває можливість аналізувати багатопараметричні дані систем моніторингу SATEC / SCADA, прогнозувати ризик відмови та забезпечувати превентивне керування активними елементами Smart-мереж – установками зберігання енергії (УЗЕ) та управління попитом.

Мета дослідження. Створення цифрової методики прогнозування надійності систем електропостачання комунально-побутових об'єктів на базі алгоритму RF та інтеграція цього модуля у структуру Smart Grid.

Завданням дослідження стало формування цілісної методики цифрового аналізу та прогнозування надійності систем електропостачання комунально-побутових об'єктів із використанням алгоритму RF. Для досягнення цієї мети передбачалося створення репрезентативного набору характеристик, що описують електричні, якісні та експлуатаційні параметри мережі, зокрема напругу, струм, коефіцієнт потужності, потужність, показники якості електроенергії і технологічний стан обладнання. На основі цих даних було розроблено процедуру попередньої обробки та нормалізації вимірювань приладів SATEC для забезпечення їхньої сумісності з алгоритмами машинного навчання. Подальший етап передбачав побудову моделі RF, здатної класифікувати режими роботи системи за трьома станами – нормальним, аномальним і передаварійним (відмова). Завершальним елементом методики стало інтегрування отриманої моделі у контур системи SCADA для автоматизованого прийняття рішень щодо керування резервними джерелами, попередження оператора та підвищення загальної надійності Smart-мережі. Джерелом даних слугували змодельовані часові ряди насосної станції за 7 діб з кроком 1 хв, що містили параметри:

- **електричні:** $U_{L1}, U_{L2}, U_{L3}, I_{L1}, I_{L2}, I_{L3}, \cos\varphi, P, Q, S$;
- **якість енергії:** коефіцієнт гармонічних складових напруги, кількість просідань та короткочасні підвищення напруги;
- **експлуатаційні:** температура, стан роботи насосного агрегату станції.

Попередня обробка включала фільтрацію, усереднення, побудову окремих часових фрагментів (10 хв), формування добових та тижневих ознак (hour, dow). Мітка event_label $\in \{0, 1, 2\}$ позначала: 0 – норма, 1 – аномалія, 2 – відмова. Модель RF реалізована у середовищі **Python / scikit-learn** з параметрами: n_estimators = 300, max_depth = 12, class_weight = 'balanced'. Розподіл вибірки – 70 % навчання, 30 % тест. Ансамблевий метод, об'єднує множину дерев рішень. Кожне дерево навчається на випадковій підвибірці даних і підмножині ознак. Для входу X прогноз визначається наступним чином:

$$\hat{y} = \text{mode}\{h_i(X)\}_{i=1}^{N_t}, P_k(X) = \frac{1}{N_t} \sum_{i=1}^{N_t} I(h_i(X) = k),$$

де N_t – кількість дерев, $P_k(X)$ – ймовірність належності до класу k . Стохастичність навчання забезпечує стійкість до шумів і дозволяє використовувати реальні вимірювання без складних фільтраційних моделей.

Практична значимість. Навчання проведено на вибірці $\approx 20\ 000$ записів. Підтверджена ефективність моделі Random Forest: правильно розпізнає небезпечні стани з імовірністю 93 %, добре «ловить» рідкісні передаварійні ситуації (показник 0.78) і завчасно виявляє близько 85 % потенційних відмов. При цьому кількість фальшивих тривог залишається низькою — приблизно 5 % від усіх нормальних ситуацій. Це означає, що модель може використовуватися як надійний модуль раннього попередження в системах електропостачання. Середній показник SAIDI для досліджуваного об'єкту зменшився на 12 %, а SAIFI – на 10 %. Smart Reliability Index (SRI) зріс із 0.88 до 0.91. Розроблений модуль реалізовано як програмний сервіс, що взаємодіє з SCADA через Modbus/TCP за алгоритмом роботи:

Дані SATEC $\rightarrow$ Попередня обробка $\rightarrow$ Random Forest $\rightarrow$ Прогноз ризику $\rightarrow$
 якщо $P_{\text{fail}} > 0.7 \rightarrow$ попередження оператору
 якщо $P_{\text{fail}} > 0.9 \rightarrow$ активація ESS / DSM

Вихідні результати моделі подаються у вигляді ймовірності ризику (0...1) та класу стану (0, 1, 2), що дозволяє SCADA-системі автоматично приймати рішення або передавати тривогу оператору.

Висновки. Запропонована цифрова методика прогнозування надійності систем електропостачання комунально-побутових об'єктів на основі алгоритму RF забезпечує високу точність оцінювання стану мережі (близько 91 %) і дає змогу своєчасно виявляти потенційні відмови до їхнього настання. Найбільший вплив на рівень надійності мають спотворення гармонік напруги та відхилення напруги, що підкреслює необхідність постійного моніторингу параметрів якості електроенергії. Інтеграція модуля RF у структуру мережі підвищує адаптивність системи, сприяє зниженню показників SAIDI і SAIFI та зростанню Smart Reliability Index до 0,91, створюючи передумови для впровадження інтелектуального енергоменеджменту муніципальної інфраструктури.

Ключові слова: Smart Grid, RF, SAIDI, SAIFI, якість електроенергії, машинне навчання, SCADA, SATEC, енергоменеджмент, прогноз відмов.

Список використаних джерел:

1. ДСТУ EN 50160:2023 (EN 50160:2022, IDT). Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загального користування. – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2023. – 48 с.
2. IEEE Std 1366-2023. IEEE Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices. – New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2023. – 68 p.
3. Мельник, О. В., Сотник, С. П. Цифровізація систем електропостачання на засадах Smart Grid: стан і перспективи розвитку // Вісник НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського». Серія: Енергетика. – 2023. – №2. – С. 31–39.
4. Кулик, І. В. Оцінювання надійності розподільних мереж із використанням машинного навчання // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2024. – №1. – С. 42–49.
5. Breiman, L. Random Forests // Machine Learning. – 2001. – Vol. 45, No. 1. – P. 5–32.
6. Zhang, H., & Wang, Z. Machine Learning-Based Fault Prediction in Power Distribution Systems // Electric Power Systems Research. – 2023. – Vol. 219. – Article 109118.
7. Chen, C., & Xu, Y. Data-Driven Reliability Assessment of Smart Distribution Networks Using Ensemble Learning // IEEE Transactions on Smart Grid. – 2022. – Vol. 13, No. 6. – P. 4820–4831