МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЗАПОРІЗЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

ТИЖДЕНЬ НАУКИ-2026

Електротехнічний факультет

Збірник тез доповідей щорічної
науково-практичної конференції серед студентів,
викладачів, науковців, молодих учених і аспірантів

13–17 квітня 2026 року

Електронне видання на DVD-ROM

Запоріжжя • НУ «Запорізька політехніка» • 2026

УДК 621.3:620.9:621.38:62-52:53:378.091.33
Т39

Рекомендовано до видання Вченою радою
Національного університету «Запорізька політехніка»
(Протокол № 13 від 26.06.2026 р.)

Рецензенти:
1. ШПІКА Микола Іванович – заступник директора навчально-наукового інституту Енергетичної, інформаційної та транспортної інфраструктури, доцент кафедри Електричного транспорту Харківського національного університету міського господарства імені Бекетова, кандидат технічних наук, доцент.
2. ЗАЧЕПА Юрій Володимирович – заступник директора з навчально-методичної та педагогічної роботи Навчально-наукового інституту Електричної інженерії та інформаційних технологій Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, доцент кафедри Систем автоматичного управління і електроприводу, кандидат технічних наук, доцент.
3. АНДРЄЄВ Андрій Миколайович – завідувач кафедри загальної та прикладної фізики Запорізького національного університету, доктор педагогічних наук, професор.

Упорядник: *Тетяна ТАТАРЧУК,* канд. техн. наук, доцент

Голова редколегії: Вадим ШАЛОМЄЄВ, проректор з НР, д-р техн. наук, професор;
Члени редколегії:
Олексій КУЗЬКІН, декан транспортного факультету, д-р техн. наук, професор;
Василь ГЛУШКО, декан машинобудівного факультету, канд. техн. наук, доцент;
Євген ПАРАХНЄВИЧ в. о декана інженерно-фізичного факультету, канд. техн. наук, доцент;
Микола АНТОНОВ, декан електротехнічного факультету, канд. техн. наук, доцент;
Ольга БАБЕНКО, в. о. декана факультету будівництва, архітектури та дизайну, канд. техн. наук;
Наталія ФУРМАНОВА, декан факультету інформаційної безпеки та електронних комунікацій, канд. техн. наук, доцент;
Марія ТЯГУНОВА, декан факультету комп'ютерних наук та технологій, канд. техн. наук, доцент;
Тетяна ХІТРОВА, в. о. декана гуманітарного факультету, канд. філолог. наук, професор;
Світлана КОКАРЕВА, декан факультету управління фізичною культурою та спортом, канд. наук з фіз. вих. і спорту, доцент;
Олена ВАСИЛЬЄВА, декан факультету бізнес-технологій та економіки, д-р економ. наук, професор;
Юрій ФІЛЕЙ, декан юридичного факультету, канд. юр. наук, професор;
Таісія ГАЙВОРОНСЬКА, декан факультету соціальних наук, канд. філос. наук, доцент;
Наталя ВИСОЦЬКА, начальник патентно-інформаційного відділу;
Наталія САВЧУК, начальник РВВ;
Сніжана ВИЧУЖАНІНА, керівник ВНРС;
Тетяна ТАТАРЧУК, відповідальна на факультеті

Т39 **Тиждень науки-2026. Електротехнічний факультет.** Тези доповідей науково-практичної конференції (Запоріжжя, 13–17 квіт. 2026 р.) [Електронне видання] / редкол.: В. Шаломєєв (відп. ред.). Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2026. 254 с. 1 електрон. опт. диск (DVD-ROM).

ISBN 978-617-529-549-6

Зібрані тези доповідей, заслуханих на щорічній науково-практичній конференції серед студентів, викладачів, науковців, молодих учених і аспірантів. Збірка відображає широкий спектр тематики наукових досліджень, що проводяться на електротехнічному факультеті Національного університету «Запорізька політехніка». Збірка розрахована на широкий загал дослідників та науковців

УДК 621.3:620.9:621.38:62-52:53:378.091.33

ISBN 978-617-529-549-6

© Національний університет
«Запорізька політехніка»
(НУ «Запорізька політехніка»), 2026

Зміст

СЕКЦІЯ «ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА» 13

Підвищення ефективності когенераційних енергосистем промислових підприємств
О.А. Шрам, Ю.Г. Качан 13

Автоматизована система обліку електроенергії для виробництва графітових електродіВ
П.В. Махлін 14

Цифровий струм
Д.В. Федоша 16

Електропостачання промислового підприємства від сонячної електростанції
А.П. Заболотний 19

Підвищення енергоефективності будівель шляхом впровадження теплонасосних систем теплопостачання
Ю.Б. Ліуш 20

Порівняльний аналіз вимог щодо якості електроенергії в україні та країнах світу
О.А. Шрам, А.В. Свергун 22

Особливості проєктування систем охолодження перетворювачів частоти для індукційних установок комплексів виробництва безшовних труб
Д.О. Кулагін, С.В. Кришталь 24

Сучасні підходи до побудови електроенергетичних мереж та систем
Д.О. Кулагін, В.Ф. Дєвочкін 25

ПІдвищення ефективності планування та адаптивного керування електроспоживанням промислового підприємства в умовах функціонування ринку електроенергії
Д.О. Кулагін, С.А. Лазаренко 26

Improving the efficiency of planning and adaptive control of electricity consumption at an industrial enterprise under the conditions of the electricity market functioning
D. Kulagin, S. Lazarenko 27

The technical operation of a ship's electric power system
D. Kulagin, I. Maslov 28
Modern approaches to surge protection in networks with isolated and grounded neutrals
D. Kulagin, B. Dzhebarov 29
Ефективність регулювання графіка навантаження промислового підприємства
Д.С. Політаєв, К.О. Братковська 30
Methodological Frameworks for Modernizing Electrical Networks and Systems
D. Kulagin, N. Kulagina 33
Технології smart grid в україні: підвищення надійності та гнучкості систем електропостачання промислових підприємств
Д.О. Мартиш, Д.В. Федоша 34
Короткострокове прогнозування спрацьовування захисту в розподільчих пристроях 6-35 кв з використанням інтелектуального аналізу даних
С.О. Житницький, Д.В. Федоша 36
Global trends in the development of microgrids
D. Kulagin, O. Shram 38
Щодо можливості маневрування потужністю руднотермічної печі
В.Ю. Міщенко, Д.А. Ведмедко 39
Сучасні методи проєктування систем електропостачання промислових підприємств
Д.О. Кулагін, І.Ю. Пирог 40
Дистанційний захист повітряних ліній
О.А. Шрам, О.С. Брабець 41
Особливості проектування електропостачання об’єктів у воєнний час
К.О. Братковська, Д.Р. Лемешко 43
Дослідження аварійних режимів роботи системи електропостачання гірничо-збагачувального комбінату
П.В. Махлін, В.А. Сіра, О.О. Щербина 45
Енергетичний менеджмент на підприємстві: аналіз впливу на енергоефективність та екологічні показники
К.Ю. Бірківська, Ю.Б. Ліуш 46
Вплив сес на енергосистему
К.О. Братковська, А.О. Богма 48

Influence of occupant behavioral factors on building energy consumption
A. Gerasymov, V. Rieznychenko, Ya. Skryabina, Yu. Liush.....51
Основні принципи енергозбереження в побуті та світовий досвід їх впровадження
А.Є. Козак, Ю.Б. Ліуш.....53
Бар'єри на шляху розвитку малих ГЕС в Україні
В.Ю. Міщенко, О.С. Брабець, В.А. Сіра 55

СЕКЦІЯ «ЕЛЕКТРОПРИВОД ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОМИСЛОВИХ УСТАНОВОК».....57

Дослідження методів діагностування електронних модулів
М.О. Поляков 57
Методи забезпечення статичної стійкості високочастотного синхронного двигуна при живлені індукційної печі
В.В. Зіновкін, Ю.О. Крисан, А.В. Пирожок, І.В. Масловець 58
Вирішення інтегро-диференційних рівнянь складних електромеханічних систем методом граничної колокації
В.В. Зіновкін, Ю.О. Крисан, М.Л. Антонов, А.В. Пирожок, А.Е. Казурова 61
Перспективи та виклики використання безпілотних літальних апаратів у пожежогасінні: технологічний огляд та специфіка застосування в умовах надзвичайних ситуацій
А.В. Пирожок, Р.О. Павлюк 65
Як виконують заземлення в різних країнах
В.В. Козлов, О.В. Набокова.....67
Чому світлодіодна лампа світиться після вимикання?
В.В. Козлов, О.В. Набокова.....70
Інтелектуальне керування електроприводом стана холодної прокатки на основі даних моніторингу
О.С. Назарова, О.Г. Русяк 73
Проблеми використання георадарів на малих безпілотних літальних апаратах для глибинного зондування та пошуку підземних об'єктів
К.П. Скнар, А.Є. Казурова 74
Прогнозуюче керування відцентровим компресором на основі моделі
Д.С. Томін, А.Є. Казурова 76

Оптимізація електромеханічної системи в складі машини постійного струму в умовах металургійного виробництва
В.В. Зіновкін, Є.В. Васильєва, Є.Є. Потапенко, Д.Б. Расторгуєв, А.О. Богма 78

Study of the dynamics of reallocation of heat flows in air-cooled transformers
V. Zinovkin, A. Tretiakov, I. Zakharov, S. Petythov 84

Математична модель розподілу теплових потоків в сухих трансформаторах
В.В. Зіновкін, А.О. Третяков, А.Є. Кірюніна 87

Електродвигуни в електромобілях
Г.М. Романіченко, М.І. Кривохлябов 91

Підвищення чутливості електромеханічних вимірювальних систем шляхом оптимізації конструктивних параметрів
Д.І. Івлєв, Є.А. Вовк, О.С. Назарова, І.А. Мелешко 93

Підвищення ефективності сонячних панелей шляхом відстеження кута сонця
Є.В. Величко, В.В. Осадчий, Е.М. Кулиніч 95

Current state and prospects of development of Switched Reluctance Drive
V. Yachmenov, Yu. Krysan 97

Проєктування автономної енергосистеми розумного парку «Дубовий гай» на базі відновлюваних джерел енергії
Д.О. Матяш, А. Є. Шаханов, О.С. Назарова 100

Використання імітаційних моделей для автоматизації технологічних процесів
Я.С. Шматало, В.В. Осадчий, Е.М. Кулиніч 101

Система генерації електричної енергії на базі сонячних батарей
О.В. Тертишний, Д.І. Івлєв, Ю.О. Крисан, Є.В. Васильєва 103

Дослідження точності та енергетичних характеристик індукційних лічильників електричної енергії
Н.С. Бондар, І.С. Гордієнко, О.С. Назарова, І.А. Мелешко 104

Intelligent energy storage systems for automated networks
А.Є. Казурова, К.С. Мелешко, К.В. Куделя 106

Суперконденсатори
В.О. Волков, А.О. Піц-Степаненко 108

Діагностика й предиктивне техобслуговування електросистем авто
Г.М. Романіченко, М.І. Кривохлябов 109

Визначення оптимального розташування сонячних панелей для максимальної ефективності
О.В. Набокова, А.Ю. Сидоренко 110
Системи рекуперації енергії в електромобілях: топологія і схеми управління
Г.М. Романіченко, М.І. Кривохлябов 112
Вибір кращого типу генератора для побутових установок
О.В. Набокова, А.Ю. Сидоренко 113
Енергозбереження в домашніх умовах
О.В. Набокова, А.Ю. Сидоренко 115
Сучасні літій-титанатні акумулятори
В.О. Волков, М.С. Яланський 116
Чи завжди 10 000 вольтів небезпечні?
В.В. Козлов, Н.О. Прокоп'єв 118
Ризики використання літій-іонних батарей
В.О. Волков, Д.В. Перепелка 119
Двонаправлені перетворювачі та VEHICLE-to-GRID V2G *Г.М. Романіченко, М.І. Кривохлябов* 120
Бортова мережа 48 V та економія палива
Г.М. Романіченко, М.І. Кривохлябов 122
Обмеження параметрів руху БПЛА
С.Г. Деєв, І.О. Олійник 123
СЕКЦІЯ «ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ» 125
Електродинамічний аналіз та оптимізація реактивних параметрів гнучких струмопроводів у металургійному виробництві
Ю.С. Безверхня 125
Підвищення ефективності роботи сонячних електростанцій в умовах міста (повідомлення 2)
О.А. Петрик 126
Аналітичний огляд технологічного обладнання для автоматизованої шихтівки та пресування магнітопроводів електричних машин змінного струму
С.О. Лапкіна 130

Application of small hydrokinetic turbines in water resources of the zaporizhzhia region
O. Sytik 132

Підвищення ефективності роботи сонячних електростанцій в умовах міста (повідомлення 1)
О.А. Петрик, Р.О. Жуков 133

Аналіз взаємозв'язку типу трекера та параметрів, що впливають на генерацію енергії
О.А. Петрик, Р.О. Жуков 136

Оптимізація просторового позиціонування стаціонарних фотоелектричних перетворювачів для підвищення генерації електроенергії
С.О. Лапкіна, К.Г. Ляшова, І.О. Галета 139

Використання методу скінченних елементів для оцінки індуктивності розсіювання силового трансформатора
С.О. Лапкіна, Р.Д. Карпенко, Д.С. Чевичелов 141

Вектор розвитку технологій двигунів на постійних магнітах
С.О. Лапкіна, В.Р. Ільченко, Т.Ш. Лєсбаєв 143

Аналіз постачальників холоднокатаної анізотропної електротехнічної сталі для регіону східної Європи
С.О. Лапкіна, Р.Є. Крашевський , Н.О. Воскобойник 145

Оптимізація параметрів схеми примусового дугогасіння вимикача постійного струму
А. Є. Шамрай 147

Важливість розвитку відновлюваної енергетики в Україні
В. В. Дубровський 149

Investigation of energy characteristics in a high-voltage induction electric drive
A. Synetskyi 151

Безщіткові двигуни постійного струму: еволюція та сучасне застосування в електротехніці
Д. О. Мішков 152

Modeling of the electromagnetic field of an induction motor with a short-circuit rotor in the emergence of eccentricity
T. Demchenko, D. Kolyada 154

Сучасні трансформатори з повітряним охолодженням: аргументи доцільності, конструкція та перспективи застосування
А.А. Дівчук, В.А. Дівчук 155

Особливості задач теоретичних розрахунків силових трансформаторів
Т. Ш. Аліяров, К. Л. Каптюх 158

Відновлювана енергетика: стратегічний шлях до екологічної та енергетичної безпеки
Д.М. Пінчук, Р.М. Ковальков 160

Застосування технологій штучного інтелекту в системах управління вітропарками для максимізації їх ККД
Д.О. Коціло 162

Інтелектуальні електричні мережі (Smart Grid) як основа модернізації енергосистем України
Є. Є. Криленко 164

Практична реалізація моделювання електричних кіл засобами PYTHON
М.В. Загайкевич Д.С. Крітіна 166

Програмна реалізація та fem-валідація методу розрахунку індуктивності силового трансформатора
Р.О. Якубін, Д.А. Терещенко 168

Програмна реалізація системи активного відстеження сонця для підвищення ефективності сонячних колекторів
Д.Є. Олійник, К.С. Мокроусов 169

«Зелене» підприємництво, як механізм виживання та відбудови
А.А. Доценко, А.М. Опанасенко 170

Трансформація екологічних стратегій у механізми економічної стійкості територіальних громад
І.Г. Зубченко, Р.М. Бойко 173

Чинники старіння електротехнічної сталі в електричних машинах при експлуатації та ремонті
Д. О. Коціло, С. М. Кириленко 175

Аналіз ефективності систем безперервного моніторінгу силових масляних трансформаторів
В.М. Коптєв, С.М. Бредун 178

Вплив експлуатаційного старіння та ремонтних втручань на робочі параметри електричнихмашин (на прикладі асинхронних двигунів)
В.М. Табачук, С.О. Гарбут 180

СЕКЦІЯ «ЕЛЕКТРИЧНІ ТА ЕЛЕКТРОННІ АПАРАТИ»..... 185

Development and enhancement of mathematical models of interconnected AC electromechanical converters on a common shaft
M. Hizenko, D. Lukash, M. Kotsur 185

Оцінка експлуатаційних характеристик електричних мереж 10–35 кВ в умовах навантаження енергосистеми
Л.Б. Жорняк, В.В. Бахметьєв 186

Features of the operating modes of a synchronous generator with combined windings
O. Klishchevskyi, M. Kotsur 188

Application of polar coordinates in mathematical models of ac electromechanical converters
D. Lukash, M. Hizenko, M. Kotsur 189

Метод зниження інтенсивності часткових розрядів у конденсаторній ізоляції трансформаторів струму класу напруги 110-330 кВ
Л.Б. Жорняк, В.М. Щусь 191

Підвищення надійності електроустановок АЕС при «дальньому резервуванні»
Л.Б. Жорняк, О.П. Левченко 193

Фізичні основи та електричні характеристики фотоелектричних елементів
Т.В. Татарчук, Р.Е. Мохнач 195

Реалізація імпульсного режиму при модернізації джерела живлення верстата ехс-5а
Г.М. Стрункін, І.І. Білий, М.С. Вербицький 202

Техніко-економічне обґрунтування модернізації зовнішнього освітлення території підприємства
А. М. Медведєв, Я. В. Селецька 204

Оцінка втрат електричної енергії в силовому трансформаторі
С. В. Павленко 206

Аналіз втрат електричної енергії в розподільчих мережах та способи їх зменшення
Ю. С. Буланова 207

Моделювання дугових процесів при відключенні струмів короткого замикання в вимикачах з дугогасним пристроєм автокомпресійного типу
М. Г. Фуртат, В. О. Шкарупа 209

Оцінка заощадження електричної енергії на промисловому майданчику на підприємстві ПрАт «Укрграфіт»
М. С. Петрушин 211

Різниця використання індуктивної та електричної нагрівної поверхні для домашніх плит
М. А. Христич 213

Методи неруйнівного контролю литих деталей в електроапаратобудуванні
В. В. Василевський, Я. В. Василевська 215

Дослідження впливу конструктивних чинників та режимів навантаження на показники експлуатаційної надійності високовольтних розподільних пристроїв
О. І. Афанасьєв, Л. С. Скрупская, О. С. Гуржий 216

Сучасні комплектні розподільчі пристрої 6–10 кВ: будова та експлуатаційні характеристики
М.В. Антонова, С.А. Белобок, Д.О. Ткаченко 218

Аналіз існуючих систем керування некерованими електроприводами
М.В. Антонова, Д.Т. Запривода, Є.В. Самаренко 220

Аналіз структурних особливостей елементів струмопровідного контуру у розподільних пристроях
Л. С. Скрупська, Д. С. Зінченко, К. І. Мазур 221

Аналіз систем керування двигунами постійного ст руму в режимі сталого навантаження
М.В. Антонова, Д.В. Соловйов, В.О. Зінченко 223

Виклики для електроенергетичної системи України у воєнний стан
О. В. Немикіна, О. А. Стовбуров 224

Оцінка ефективності компенсації реактивної потужності при різкозмінних навантаженнях промислового підприємства
О. В. Немикіна, В. О. Тертишний 227

Дахова сонячна фотоелектростанції як напрямок для підвищення енергетичної незалежності сучасного промислового підприємства
О. В. Немикіна, В. Р. Харченко, М. С. Петрушин 230

СЕКЦІЯ «ФІЗИКА» **232**

Сучасні тенденції трансформації технічної та професійної освіти
Т.В. Татарчук 232

Оптичні джерела випромінювання в системах люмінесцентного неруйнівного контролю
Т.В. Татарчук, І.П. Новохатній 239

Justification of the use of copper-graphite composites for ecological production
D. Nechaiev, T. Tatarchuk, R. Mokhnach, N. Zhukova 243

Електронний термометр
О.І. Золотаревський 246

Механізм анізотропії кОгезійнОЇ міцності плазмового покриття
А.В. Єршов, С.В. Лоскутов, Є.О. Павлюк 247

Маятник Обербека: розробка програмного засобу для розрахунку моментів інерції
І.І. Сапронов, Т.В. Татарчук, Л.В. Гуляева 249

СЕКЦІЯ «ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА»

УДК 621.311:620.92
Шрам О.А.[1], Качан Ю.Г.[2]
[1] зав. каф. НУ «Запорізька політехніка»
[2] проф. НУ «Запорізька політехніка»

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КОГЕНЕРАЦІЙНИХ ЕНЕРГОСИСТЕМ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

Сьогодні питання підвищення енергоефективності промислових об'єктів шляхом впровадження власних сонячних потужностей набуває особливої актуальності. Значний потенціал для розміщення фотоелектричних систем мають дахи виробничих споруд. Використання таких систем дозволяє суттєво знизити обсяги електроенергії, яка споживається з енергосистеми. Наразі значна увага приділяється методології вибору оптимальних локацій для панелей, оцінці рівня сонячної інсоляції, а також моделюванню впливу затінення від навколишньої інфраструктури, яке може критично знижувати ефективність генерації [1,2].

Ключовою перешкодою для розширення використання сонячної енергії на промислових об'єктах є дефіцит вільних площ. Оскільки територіальні ресурси підприємств обмежені, подальше нарощування потужностей традиційними методами стає неможливим. Ситуацію ускладнює розподіл доступного простору між фотоелектричними системами та тепловими колекторами, що може знижувати загальний потенціал електрогенерації. Відтак, виникає гостра потреба у впровадженні інноваційних рішень, здатних підвищити питому ефективність геліостанцій в умовах обмеженої площі.

Інтеграція систем охолодження фотоелектричних перетворювачів у єдиний контур дозволяє створити надійну геліосистему, що запобігає перегріву панелей та забезпечує циркуляцію значного об’єму теплоносія зі стабільною температурою, вищою за довкілля. Для ефективної утилізації надлишкового тепла пропонується використовувати цей потік як джерело енергії для первинного контуру теплового насоса типу «вода-вода». Таким чином, у вторинному контурі теплового насоса формується потік теплоносія з вищим температурним потенціалом, достатнім для забезпечення технологічних потреб підприємства. Такий підхід дозволяє відмовитися від встановлення окремих сонячних колекторів, зберігаючи дефіцитні виробничі площі для розгортання додаткових потужностей СЕС. Загальна принципова схема запропонованої когенераційної системи наведена на рис. 1.

Запропоноване поєднання сонячних перетворювачів із водяним охолодженням та теплових насосів дозволяє реалізувати високоефективну когенераційну систему. Такий підхід забезпечує підвищення питомої електричної

потужності внаслідок стабілізації температурного режиму панелей та одночасну генерацію значних обсягів теплової енергії для технологічних потреб підприємства.

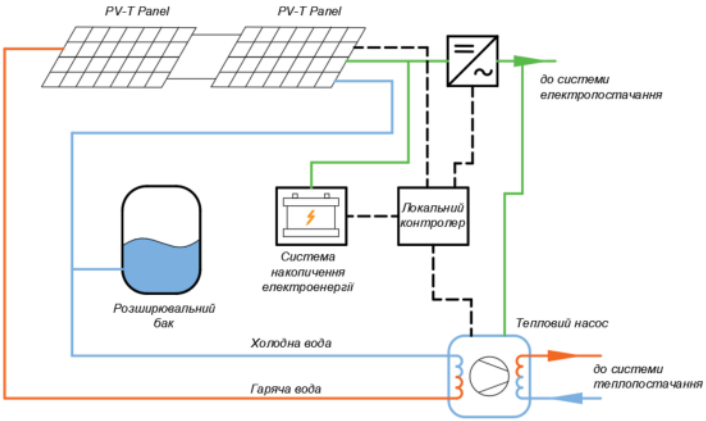


Рисунок 1 – Принципова схема запропонованої когенераційної геліосистеми.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. The effect of shading on photovoltaic solar panels / J. P. N. Torres et al. *Energy Systems*. 2016. Vol. 9, no. 1. P. 195–208. URL: https://doi.org/10.1007/s12667-016-0225-5 .

2. Качан Ю. Г., Шрам О. А. Щодо можливості створення ефективних сонячних електростанцій на території промислових підприємств. *Відновлювана енергетика*. 2024. № 1(76). С. 22–31. URL: https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.1(76).22-31 .

УДК 692.92
Махлін П.В.
доц. НУ «Запорізька політехніка»

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ОБЛІКУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ГРАФІТОВИХ ЕЛЕКТРОДІВ

Виробництва графітованих електродів для електросталеплавильних, руднотермічних та інших видів електричних печей є дуже енергоємним. Особливістю роботи печей графітації є нерівномірність споживання електричної енергії на протязі технологічного процесу. При цьому актуальною задачею є зробити режими роботи печей таким, щоб сумарне споживання електроенер-

гії було більш рівномірним, що підвищить енергоефективність виробництва електродів. Для рішення цієї задачі важливим є створення автоматизованої системи обліку електричної енергії.

Структурна схема автоматизованої системи обліку електричної енергії складається з трьох рівнів:

нижній рівень - вимірювальні трансформатори струму (ТС) та напруги (ТН) та лічильник електроенергії;

середній рівень — контролери (спеціалізовані вимірювальні системи) з програмним забезпеченням енергообліку, що здійснюють у заданому циклі інтервалу усереднення цілодобового збору вимірювальних даних з територіально розподілених споживачів, а також накопичення, обробку та передачу цих даних на верхній рівень. Для обліку електроенергії на середньому рівні використовуються прилади обліку. Для технічного обліку використовуються також телемеханіка з входами телевимірювань, до яких підключають телеметричні (імпульсні) виходи лічильників;

верхній рівень - персональний комп'ютер або комп'ютерна мережа зі спеціалізованим програмним забезпеченням, що здійснює збір інформації з контролерів середнього рівня, проводить підсумкову обробку інформації, що поступає з підрозділів підприємства, а також відображає та документує дані обліку у вигляді, зручному для аналізу й прийняття рішень.

Усі вимірювальні (а також обчислювальні) засоби та лінії зв'язку впливають на точність обліку електроенергії по кожній точці обліку. До каналу входять усі вимірювальні перетворювачі та канали зв'язку, в яких інформація передається у аналоговому вигляді, а також обчислювальні засоби, які впливають на точність передавання облікових даних. При формуванні пакетів даних для передачі на інший рівень може бути змінена форма подання числа).

Основними показниками, що характеризують ефективність інформаційно-вимірювальної техніки в системі обліку, є точність подання вимірювальної інформації та її достовірність. Первинна система обліку електроенергії (нижній рівень), що складається з ТС, ТН та лічильника електроенергії, повинна забезпечити достатньо високий рівень точності. Для того, щоб був забезпечений клас точності ТС та ТН проводиться розрахунок завантаження їх вторинних обмоток. Як правило, основним приладом для ТС та ТН є лічильник електроенергії, але дуже великою долею у їх навантажені є опір контрольних кабелів, що з'єднують їх з лічильником. Тому при розрахунках вбирається переріз контрольних проводів. Крім того, з урахуванням нерівномірності споживання електроенергії при технологічному процесі клас точності ТС та лічильника вибраний 0,5S. Похибка первинної вимірювальної системи визначається по формулі, %:

$$\delta = \sqrt{(\delta_{\text{ТС}}^2 + \delta_{\text{ТН}}^2 + \delta_{\text{л}}^2)}$$

де $\delta_{\text{л}}$ - похибка лічильника, що відповідає класу точності 0,5S (%);

$\delta_{\text{ТС}}$, $\delta_{\text{ТН}}$- похибки ТС та ТН, що відповідає класу точності 0,5S та 0,5, відповідно, (%).

Таким чином похибка первинної системи вимірювання 0,87%.

За допомогою автоматизованої системи обліку проведенні дослідження та складені графіки споживання електроенергії при виготовлені різних типів електродів, проведенний аналіз та запропонувати графік виробництва електродів, при якому сумарне споживання електроенергії буде більш рівномірним, що дозволить зменшити втрати електроенергії в системі електропостачання та підвищити енергоефективність технологічного процесу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Правила улаштування електроустановок. – 5-е вид., перероб. та доповн. – Х.: Індустрія, 2017 – 964 с.

2. Розен В.П. Використання внутрішніх резервів технологічних процесів при керуванні режимами електроспоживання промислових підприємств / В.П. Розен, М.В. Прокопець // Автоматизація виробничих процесів: Всеукр. наук.-техн. журн. – 2006. – №1(22). – С.26-30.

УДК 621.316.11
Федоша Д.В.
доц. НУ «Запорізька політехніка»

ЦИФРОВИЙ СТРУМ

Сучасна електроенергетика перебуває у стані активної трансформації, пов’язаної з цифровізацією та інтеграцією відновлюваних джерел енергії. У цих умовах традиційні підходи до передачі електроенергії вже не забезпечують необхідного рівня ефективності та керованості. Саме тому зростає інтерес до нових концепцій, зокрема до цифрового струму [1].

Цифровий струм дозволяє передавати енергію у вигляді керованих імпульсів, що відкриває можливості для більш точного регулювання потужності та швидкого реагування на зміну навантаження. Це особливо актуально для smart grid та мікромереж, де важлива адаптивність системи [2].

Цифровий струм принципово відрізняється від аналогового (безперервного) струму способом передачі енергії. У традиційних електричних мережах струм змінюється безперервно у часі, тобто:

$$I(t) = I_m sin(\omega \cdot t), \quad (1)$$

де I_m - амплітуда струму;
ω - кутова частота.

У випадку цифрового струму передача енергії відбувається дискретними імпульсами:

$$I(t) = \sum_{k=0}^{n} I_m \cdot rect\left(\frac{t-k\cdot T}{\tau}\right), \quad (2)$$

де $I(t)$- миттєве значення струму;
I_m- амплітуда струму;
T- період імульсу;
τ- тривалість імпульсу.

Середнє значення струму визначається коефіцієнтом заповнення:

$$I_{\text{сер}} = \frac{1}{T}\int_0^T I\,(t)dt = D \cdot I_{max}, \quad (3)$$

де $D = \tau/T$- коефіцієнт заповнення;
I_{max}- максимальний струм.

Передана енергія буде визначатись окремими імпульсами:

$$WI = \int U\,(t) \cdot I(t)dt \approx U \cdot I \cdot \tau, \quad (4)$$

У цифровому струмі струм протікає лише під час імпульсу, то середні втрати можуть бути знайдені як:

$$\Delta P_{\text{сер}} = \frac{1}{T}\int_0^T I\,(t)^2 R dt. \quad (5)$$

Якщо прийняти T=1 год, а також, що Im = const на інтервалі від 0 до T, то

Або через коефіцієнт заповнення:

$$\Delta W \approx D \cdot I_m^2 \cdot R. \quad (6)$$

А значить потужність, яка передається споживачу:

$$P \approx D \cdot U_m \cdot I_m. \quad 7)$$

Поєднавши (6) та (7) в систему рівнянь можна створити модель оптимізації системи електропостачання, для знаходження оптимального значення коефіцієнту заповнення D при якому досягається максимізація коефіцієнт корисної дії мережі.

Користуючись системами керування коефіцієнтом заповнення з зворотнім зв'язком за необхідною потужністю можна досягти максимального коефіцієнту корисної дії не тільки на етапі проектування, але ї в процесі експлуатації.

Цифровий струм вже застосовується не лише в лабораторних умова, а й на реальних об'єктах різного типу: в аеропортах для LED освітлення, у комерційних будівлях для PoE інфраструктури, у готелях для систем «розумного» дому і на транспортних вузлах для 4G, 5G та Wi Fi мереж [3,4].

Цифровий струм є перспективним напрямом розвитку електроенергетики, який поєднує імпульсну передачу енергії та цифрове керування. Його використання дозволяє підвищити ефективність, гнучкість і безпеку електричних систем. Особливо важливим є його застосування у smart grid та децентралізованих енергосистемах, де необхідна швидка адаптація до змін режимів роботи [5].

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Heluany J., Gkioulos V. A review on digital twins for power generation and distribution // International Journal of Information Security. 2023. Vol. 23. P. 1171–1195.

2. Almeida L., Santos F. Smart grid communication networks and teleprotection: key technologies and challenges // Electric Power Systems Research. 2023. Vol. 23. P. 174049–174079.

3. Fraunhofer CSE, U.S. Department of Energy. Final Report: Low Cost, High Efficiency Integration of SSL and Building Controls Using Digital Electricity [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://voltserver.com/wp-content/uploads/2024/04/Whitepaper-SBIR-Phase-II-Final-Report.pdf (дата звернення: 01.04.2026).

4. VoltServer. Sinclair Hotel: Texas First Intelligent Building Powered by Digital Electricity [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://voltserver.com/blog/case-study/sinclair-hotel-texass-first-intelligent-building-powered-by-digital-electricity/ (дата звернення: 01.04.2026).

5. Sifat Md. M. H., Choudhury S. M., Das S. K. et al. Towards electric digital twin grid: technology and framework review // Energy and AI. 2023. Vol. 11. Article 100213.

УДК 621.316.11
Заболотний А.П.
доц. НУ «Запорізька політехніка»

ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПРОМИСЛОВОГО ПІДПРИЄМСТВА ВІД СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

Під час війни російський агресор щодня б’є по електроенергетичній системі як по генерації так і по розподіленню що наносить невиправної шкоди системі. Всі енергетики країни сумлінно виконують відновлювальні роботи навіть під обстрілами та намагаються забезпечити електроенергією всіх споживачів. В прифронтових районах під удар попадають не потужні трансформаторні підстанції та лінії електромереж, що є найпростішими елементами мережі та не потребують великих грошових вкладень та відновлюся швидко.

Однак ці фактори вносять постійний небаланс в мережу та не дають швидко відновити баланс в генерації та споживанню. Для того щоб система стабілізувалася постійно виконуються аварійні відключення як споживачів так і генерації. Сам по собі небаланс системи може бути більш руйнівним в порівняні з обстрілами.

В моменти критичного підвищення чи пониження частоти необхідно негайно вимикати від системи елементи мережі. Що в свою чергу затягує відновлення електропостачання. Тому що для нарощування генерації потрібно симетрично нарощувати споживання. В такому випадку навіть коли вся електромережа ціла, відновлення генерації до сталої потужності займає від годин до кілька днів.

Таким чином, у сучасних умовах планових та аварійних відключень від систем електропостачання споживачів вони потребують нових джерел електричної енергії (ЕЕ). У зв'язку з цим найбільш широке впровадження отримують відновлювані джерела ЕЕ (ВДЕ), такі як: вітро, геліо та малі гідроелектростанції. Це зумовлено доступністю первинного енергоносія (сонце, вітер, гідропотенціал малих річок), досить високим рівнем і доступністю технологій перетворення останнього в ЕЕ, а також наявними економічними передумовами для їх впровадження.

Електропостачання промислового підприємства від сонячної електростанції (СЕС) набуває великої актуальності з точки зору економії електроенергії та заощадження коштів. Особливо в пікові години генерація СЕС припадає на пікові години споживання електроенергії споживачами. Що в свою чергу призводить до підвищення ціни за 1 кВт енергії на ринку електроенергії. Та використання системи (СЕС-Гібридний інвертор- Мережа) в довоєнні часи це була значна економія для юридичних споживачів.

Показано що СЕС для промислового підприємства може забезпечити додаткові години роботи в часи відключень світла та грошову економію в

часи стабільного електропостачання. А правильно підібраний інвертор дозволить підмішувати згенеровану електроенергію до спожитої електроенергії від мережі щоб знизити втрати напруги.

УДК 620.9:697.1:621.577
Ліуш Ю.Б.
доц. НУ «Запорізька політехніка»

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ БУДІВЕЛЬ ШЛЯХОМ ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕПЛОНАСОСНИХ СИСТЕМ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

У сучасних умовах трансформації енергетичного сектору, зростання вартості енергоресурсів та посилення екологічних вимог питання підвищення енергоефективності будівель набуває особливої актуальності [4]. Будівельний сектор є одним із найбільших споживачів енергії, що обумовлює необхідність впровадження інноваційних технологій теплопостачання та енергозбереження.

Значна частина існуючих будівель характеризується високим рівнем тепловтрат через огороджувальні конструкції, неефективні системи опалення та відсутність сучасних систем управління енергоспоживанням. Традиційні системи теплопостачання, що базуються на використанні викопних видів палива, мають низьку ефективність і супроводжуються значними викидами парникових газів [4]. У зв'язку з цим особливого значення набуває перехід до енергоефективних та екологічно безпечних технологій.

Одним із перспективних напрямів модернізації систем теплопостачання є використання теплонасосних установок. Принцип їх роботи полягає у перенесенні теплової енергії з низькопотенційних джерел (повітря, ґрунту, води) до системи опалення будівлі за рахунок витрат електричної енергії [1, 2]. Такий підхід дозволяє отримувати у декілька разів більше теплової енергії порівняно з витраченою електроенергією, що забезпечує високий коефіцієнт перетворення енергії [2].

Застосування теплових насосів є особливо ефективним у поєднанні з низькотемпературними системами опалення, що дозволяє підвищити їх енергетичну ефективність та забезпечити комфортні умови в приміщеннях [5]. Крім того, теплонасосні системи можуть працювати в реверсивному режимі, забезпечуючи не лише опалення, а й охолодження будівель у теплий період року [5].

Важливим аспектом є вибір типу теплового насоса. Повітряні теплові насоси характеризуються відносною простотою монтажу та нижчими капітальними витратами, однак їх ефективність залежить від температури зовніш-

нього повітря. Ґрунтові та водяні теплові насоси мають більш стабільні показники роботи протягом року, але потребують складніших інженерних рішень та більших інвестицій [5].

Ефективність впровадження теплонасосних систем значною мірою залежить від комплексного підходу до модернізації будівлі. Проведення енергоаудиту дозволяє визначити основні джерела тепловтрат і сформувати обґрунтований перелік енергозберігаючих заходів. Зменшення тепловтрат через утеплення огороджувальних конструкцій, модернізація систем вентиляції та впровадження автоматизованих систем управління енергоспоживанням є необхідними умовами досягнення високої ефективності [3].

З екологічної точки зору використання теплових насосів сприяє суттєвому зниженню викидів парникових газів, зокрема вуглекислого газу, а також зменшенню використання викопних видів палива [3, 4]. Це відповідає сучасним вимогам сталого розвитку та сприяє покращенню екологічної ситуації.

Разом з тим, впровадження теплонасосних систем може супроводжуватися певними труднощами, серед яких значні початкові інвестиції, необхідність проведення інженерних досліджень та потреба у кваліфікованому обслуговуванні. Однак у довгостроковій перспективі ці витрати компенсуються за рахунок зниження експлуатаційних витрат та підвищення енергоефективності [2].

Загальні рекомендації щодо впровадження теплонасосних систем:

– здійснення попереднього енергетичного аудиту будівлі;
– забезпечення належного рівня теплоізоляції огороджувальних конструкцій;
– вибір оптимального типу теплового насоса з урахуванням кліматичних і геологічних умов;
– застосування низькотемпературних систем опалення;
– впровадження автоматизованих систем контролю та управління енергоспоживанням;
– інтеграція теплонасосних систем із іншими відновлюваними джерелами енергії;
– проведення регулярного технічного обслуговування обладнання;
– оцінка економічної доцільності впровадження на основі життєвого циклу системи.

Таким чином, впровадження теплонасосних систем теплопостачання є ефективним інструментом підвищення енергоефективності будівель [2, 5]. Комплексний підхід до модернізації дозволяє досягти значного зниження енергоспоживання, скорочення витрат та мінімізації негативного впливу на довкілля, що є важливою складовою сталого розвитку енергетики [4].

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Hepbasli A., Kalinci Y. A review of heat pump water heating systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2009. Vol. 13, Issue 6–7. P. 1211–1229.

2. Chua K.J., Chou S.K., Yang W.M. Advances in heat pump systems: A review. Applied Energy. 2010. Vol. 87, Issue 12. P. 3611–3624.

3. Staffell I., Brett D.J.L., Brandon N.P., Hawkes A.D. A review of domestic heat pumps. Energy and Environmental Science. 2012. Vol. 5, Issue 11. P. 9291–9306.

4. Lund H., Østergaard P.A., Connolly D., Mathiesen B.V. Smart energy and smart energy systems. Energy. 2017. Vol. 137. P. 556–565.

5. Sarbu I., Sebarchievici C. General review of ground-source heat pump systems for heating and cooling of buildings. Energy and Buildings. 2014. Vol. 70. P. 441–454.

УДК 621.311: 004.94

Шрам О.А.[1], Свергун А.В. [2]
[1] зав. каф. НУ «Запорізька політехніка»
[2] асп. НУ «Запорізька політехніка»

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ВИМОГ ЩОДО ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В УКРАЇНІ ТА КРАЇНАХ СВІТУ

Проблема забезпечення якості електричної енергії (ЯЕ) не є суто технічною – вона має чітко виражений економічний вимір: збитки від неякісної електроенергії у світі щорічно оцінюються в сотні мільярдів доларів [1,2], а в Україні – у межах 3,9–6 млрд доларів на рік [3], переважно внаслідок прискореного теплового зношення ізоляції та технологічних простоїв. Саме тому провідні країни сформували власні системи технічних, нормативних та організаційних заходів протидії спотворенням, резонансним явищам, провалам напруги та гармонійним збуренням у розподільних мережах.

Європейський підхід до боротьби з неякісною електроенергією полягає насамперед у вимірюванні та дотриманні базових показників якості електричної енергії, насамперед напруги, яку видає постачальник в точці загального приєднання а також передбачає статистичний підхід – показники якості електричної енергії (ПЯЕ) мають дотримуватися впродовж 95% часу вимірювання за тиждень. Крім цього варто зазначити що показники якості описані в діючому стандарті EN:50160:2022 не є вичерпними і можуть доповнюватися за потреби і бажання урядів країн ЄС.

Україна в межах інтеграційних процесів до ЄС та як діючий учасник об'єднаної європейської енергосистеми ENTSO-E дотримується EN50160:2022. Слід зазначити що дотримання цього стандарту є критично важливим для дотримання оптимальних показників якості електричної енергії, а така особливість українських мереж як підвищена щільність струму (у порівнянні з країнами ЄС – 0,4-0,6 А/мм², тоді як щільність струму в українських мережах – близько 1 А/мм²) прямо впливає на межі застосування цього стандарту та декларує вимоги до ПЯЕ жорсткіші, ніж прописані в стандарті, оскільки внаслідок підвищеної проєктної щільності струму повний опір українських мереж значно вищий ніж у європейських і тому вплив неякісної електроенергії насамперед за показниками THD напруги і струму є значно вищим.

Американська система протидії неякісній електроенергії базується на двох ключових інструментах: стандарті IEEE 519, що встановлює граничні значення гармонійних струмів, та IEEE 1159, що класифікує електромагнітні явища. Принциповою особливістю американського підходу є покладення відповідальності за емісію гармонік на споживача — підприємства зобов'язані самостійно встановлювати засоби фільтрації у точці підключення до мережі. На практиці це стимулює широке впровадження активних гармонійних фільтрів (AHF), які здатні знижувати THD з >24% до рівня нижче 5%, а також багатопульсних перетворювачів (12-, 18-, 24-пульсних схем), що мінімізують генерацію низькочастотних гармонік безпосередньо в джерелі збурення.

Японія та Південна Корея зробили ставку на глибоку інтеграцію силової електроніки в системи електропостачання: широке застосування статичних синхронних компенсаторів (STATCOM), активних фільтрів на основі IGBT-інверторів та гібридних топологій дозволяє підтримувати оптимальні ПЯЕ в умовах високого проникнення відновлюваних джерел енергії.

Китай реалізує найбільш амбітну у світі програму побудови інтелектуальних мереж з обсягом фінансування понад 70 млрд доларів [3,7,8] зосереджену навколо концепції Supergrid на базі HVDC-технологій. Введення обов'язкових вимог стандарту GB/T 19963-2011 щодо підтримання режиму роботи вітрових електростанцій під час провалів напруги («ride-through» вимоги) стало прямою реакцією на масові системні аварії, спричинені використанням більшої кількості установок альтернативних джерел енергії (а внаслідок цього і збільшення кількості відмов внаслідок погодних факторів), і забезпечило суттєве підвищення стабільності мережі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Коваленко В. Л., Радченко В. В., Міняйло Н. О. та ін. Нормування показників якості електроенергії та причини їх відхилення від встановлених

нормативів. *Системні технології.* 2025. № 1(156). С. 177 – 189. https://doi.org/10.34185/1562-9945-1-156-2025-20 .

2. Management of Power Quality Issues from an Economic Point of View / H. Beleiu et al. *Sustainability*. 2018. Vol. 10, no. 7. P. 2326. URL: https://doi.org/10.3390/su10072326.

3. Півняк Г. Г, Жежеленко І.В., Папаїка Ю.А. Енергетична ефективність систем електропостачання: монографія / Г.Г. Півняк, І.В. Жежеленко, Ю.А. Папаїка ; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». 2-ге вид., переробл. і допов. Дніпро: НТУ «ДП». 2018. 148 с.

УДК 621.3

Кулагін Д.О.[1], Кришталь С.В.[2]
[1] проф. НУ «Запорізька політехніка»
[2] асп. НУ «Запорізька політехніка»

ОСОБЛИВОСТІ ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМ ОХОЛОДЖЕННЯ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЧАСТОТИ ДЛЯ ІНДУКЦІЙНИХ УСТАНОВОК КОМПЛЕКСІВ ВИРОБНИЦТВА БЕЗШОВНИХ ТРУБ

В умовах сучасного металургійного виробництва безшовних труб індукційні установки нагріву займають ключове місце у технологічному процесі, забезпечуючи необхідні температурні режими для деформації металу. Важливим елементом таких установок є перетворювачі частоти, які здійснюють керування енергетичними параметрами індукційного нагріву та працюють в умовах значних електричних і теплових навантажень. У процесі експлуатації в їхніх силових елементах виникають інтенсивні тепловиділення, що можуть призводити до перегріву, зниження ефективності та передчасного виходу обладнання з ладу. Це обумовлює необхідність розробки ефективних систем охолодження, здатних забезпечити стабільні температурні режими роботи за умов змінного навантаження та впливу несприятливих факторів навколишнього середовища.

Специфіка теплових режимів перетворювачів частоти:

- основні джерела тепловиділення: силові напівпровідникові модулі (IGBT, тиристори), трансформатори та дроселі, шини та контактні з’єднання;
- імпульсний та змінний характер навантаження;
- вплив режимів роботи індукційних установок (нагрів, прокатка, паузи);

Вимоги до систем охолодження:

- забезпечення допустимих температур експлуатації компонентів;
- підвищення надійності та довговічності обладнання;

- стійкість до умов промислового середовища (пил, вібрації, підвищена температура);

- енергоефективність і оптимізація витрат;

Основні етапи проєктування систем охолодження:

- розрахунок тепловиділення основних елементів перетворювачів частоти;

- вибір типу системи охолодження (повітряна, рідинна, комбінована);

- конструктивні рішення для побудови надійної, та ефективної системи охолодження;

- енергоефективність і оптимізація витрат;

Проєктування систем охолодження перетворювачів частоти потребує комплексного підходу з урахуванням особливостей теплових процесів, конструкції перетворювачів та специфіки роботи індукційних установок у складі виробничих комплексів.

УДК 621.3

Кулагін Д.О.[1], Дєвочкін В.Ф.[2]
[1] проф. НУ «Запорізька політехніка»
[2] асп. НУ «Запорізька політехніка»

СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО ПОБУДОВИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ МЕРЕЖ ТА СИСТЕМ

Сучасна енергетика переживає значну трансформацію, пов’язану з розвитком технологій, децентралізацією енергопостачання, впровадженням відновлюваних джерел енергії та зростанням вимог до надійності і гнучкості електромереж.

Тенденції розвитку електроенергетичних мереж:

– цифровізація мереж: використання смарт-лічильників, систем управління (SCADA), датчиків і IoT;

децентралізація: перехід від централізованої генерації до мікрогридів, локальних джерел енергії;

– інтеграція ВДЕ (відновлюваних джерел енергії): сонячні, вітрові, біоенергетичні установки потребують адаптації мереж до нестабільної генерації;

– енергетичне зберігання: використання акумуляторних систем для балансування навантаження;

– гнучке управління попитом (Demand Side Management);

Smart Grid — це «розумна мережа», що передбачає:

– двосторонню комунікацію між споживачем і постачальником;

– інтеграцію розподілених джерел енергії;

– підвищену ефективність, надійність, безпеку та стійкість.

Мікромережі (Microgrids) – локальні енергосистеми, які можуть функціонувати автономно або в складі загальної мережі. Підвищують енергетичну безпеку, особливо в критичних інфраструктурах.

Роль штучного інтелекту та big data:

– прогнозування попиту та генерації;

– оптимізація навантаження та керування мережами;

– виявлення аварій та несправностей у режимі реального часу.

З розвитком цифровізації зростає ймовірність кібератак, тому важливими стають захист даних, безпечна передача інформації, резервування систем.

Виклики та перспективи:

– модернізація старої інфраструктури;

– інтеграція нових технологій з мінімальними витратами;

– підвищення стійкості до змін клімату та надзвичайних ситуацій;

Сучасні електроенергетичні мережі — це складна, динамічна система, яка потребує інновацій, гнучкості й високої надійності. Перехід до Smart Grid та розвиток мікромереж – ключові кроки до енергетики майбутнього.

УДК 621.3

Кулагін Д.О.[1], Лазаренко С.А.[2]
[1] проф. НУ «Запорізька політехніка»
[2] асп. НУ «Запорізька політехніка»

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПЛАНУВАННЯ ТА АДАПТИВНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯМ ПРОМИСЛОВОГО ПІДПРИЄМСТВА В УМОВАХ ФУНКЦІОНУВАННЯ РИНКУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

В умовах функціонування ринку електроенергії для промислових підприємств актуальним є не лише планування потреби в електричній енергії, а й забезпечення здатності оперативно коригувати режим споживання відповідно до змін виробничого навантаження, зовнішніх факторів та ринкових умов. Традиційні підходи до планування, що переважно ґрунтуються на історичних показниках і нормативних припущеннях, не забезпечують достатньої точності в умовах динамічної зміни виробничих планів, специфікацій продукції, погодних умов, сезонності та коливань попиту. Це знижує ефективність використання енергетичних ресурсів і ускладнює прийняття обґрунтованих управлінських рішень.

У роботі запропоновано підхід до підвищення ефективності планування та адаптивного керування електроспоживанням промислового підприємства на основі інтеграції даних із систем енергетичного обліку, SCADA, MES, ERP та зовнішніх інформаційних джерел. Ключовою ідеєю є формування

цифрового опису виробничо-енергетичних залежностей, який дає змогу пов'язати профіль електроспоживання з виробничими операціями, режимами роботи обладнання, технологічними переходами, змінами у виробничій програмі та іншими факторами впливу.

На відміну від традиційного підходу, запропоноване рішення передбачає поєднання прогнозування очікуваного електроспоживання з механізмами активного коригування у разі виявлення відхилень або небажаних тенденцій. Це дозволяє не лише уточнювати планові обсяги споживання, а й своєчасно виявляти надлишкове або аномальне використання електроенергії, визначати його ймовірні причини та формувати рекомендації щодо подальших дій. Такими діями можуть бути коригування виробничого графіка, зміна режимів роботи окремого обладнання, уточнення параметрів технологічного процесу або узгодження режимів споживання з наявними власними генеруючими потужностями підприємства.

Отже, запропонований підхід забезпечує перехід від статичного планування електроспоживання до адаптивного керування на основі даних. Практична цінність полягає у підвищенні точності планування, покращенні керованості енергоспоживання, зменшенні непродуктивних витрат електроенергії та створенні основи для впровадження інтелектуальних систем енергоменеджменту на промислових підприємствах.

УДК 621.3

Kulagin D.O.[1], Lazarenko S.[2]
[1] prof. of the National University "Zaporizhzhya Polytechnic"
[2] graduate student, National University "Zaporizhzhya Polytechnic"

IMPROVING THE EFFICIENCY OF PLANNING AND ADAPTIVE CONTROL OF ELECTRICITY CONSUMPTION AT AN INDUSTRIAL ENTERPRISE UNDER THE CONDITIONS OF THE ELECTRICITY MARKET FUNCTIONING

Under the conditions of the functioning electricity market, it is important for industrial enterprises not only to plan their electricity demand, but also to ensure the ability to promptly adjust consumption modes in accordance with changes in production load, external factors, and market conditions. Traditional planning approaches, which are mainly based on historical indicators and normative assumptions, do not provide sufficient accuracy under dynamic changes in production plans, product specifications, weather conditions, seasonality, and demand fluctuations. This reduces the efficiency of energy resource use and complicates informed managerial decision-making.

The paper proposes an approach to improving the efficiency of planning and adaptive control of electricity consumption at an industrial enterprise based on the integration of data from energy metering systems, SCADA, MES, ERP, and external information sources. The key idea is to form a digital representation of production-energy interdependencies, which makes it possible to link the electricity consumption profile with production operations, equipment operating modes, technological transitions, changes in the production program, and other influencing factors.

Unlike the traditional approach, the proposed solution combines forecasting of expected electricity consumption with active adjustment mechanisms in the event of deviations or undesirable trends. This makes it possible not only to refine planned consumption volumes, but also to timely detect excessive or abnormal electricity use, identify its probable causes, and generate recommendations for further actions. Such actions may include adjusting the production schedule, changing the operating modes of individual equipment, refining process parameters, or coordinating consumption modes with the available on-site generation capacities of the enterprise.

Thus, the proposed approach ensures a transition from static electricity consumption planning to data-driven adaptive control. Its practical value lies in improving planning accuracy, enhancing electricity consumption controllability, reducing non-productive electricity losses, and creating a foundation for the implementation of intelligent energy management systems at industrial enterprises.

УДК 621.43
Kulagin D.O.[1], Maslov I.Z.[2]
[1] prof. of the National University “Zaporizhzhya Polytechnic”
[2] Associate Professor of the Danube Institute of the National University “Odesa Maritime Academy”

THE TECHNICAL OPERATION OF A SHIP'S ELECTRIC POWER SYSTEM

The technical operation of shipboard integrated power systems focuses on maintaining a continuous and efficient supply of electricity through a coordinated network of machinery and control units. Primary power generation relies on generator sets that serve both main and backup functions, while distribution is managed via main and auxiliary switchboards. These components are overseen by sophisticated automation and monitoring systems that regulate equipment performance, supported by emergency generators and battery banks designed to sustain critical services during a blackout.

To ensure long-term reliability in harsh maritime environments, engineers implement rigorous maintenance and diagnostic protocols. This includes the systematic inspection of insulation levels across cable networks and electrical hardware to detect degradation early. Furthermore, constant monitoring of voltage and frequency parameters remains essential, alongside physical checks of generator brushes and contacts. Testing automatic protection and stabilization systems is also a vital measure to prevent equipment failure before it occurs.

Protection mechanisms within the ship's power grid involve the use of automatic circuit breakers to mitigate the risks of short circuits and the implementation of emergency shutdown systems. Monitoring units for temperature and electrical overload are integrated to provide an additional layer of safety. Because shipboard systems must withstand high humidity, constant vibration, and fluctuating load demands, specialized measures such as anti-corrosion coatings, voltage stabilizers for surge compensation, and vibration-isolated mounts for generators are standard requirements.

Ultimately, the technical management of these systems demands a holistic approach to diagnostics and safety. By strictly adhering to regulatory procedures and incorporating modern automation technologies, operators can enhance the overall reliability of the vessel's power infrastructure. This comprehensive strategy not only reduces long-term repair costs but also guarantees the uninterrupted power supply necessary for the safe navigation and operation of the ship.

УДК 621.3
Kulagin D.O.[1], Dzhebarov B.O.[2]
[1] prof. of the National University “Zaporizhzhya Polytechnic”
[2] graduate student, National University “Zaporizhzhya Polytechnic”

MODERN APPROACHES TO SURGE PROTECTION IN NETWORKS WITH ISOLATED AND GROUNDED NEUTRALS

Electrical networks are increasingly exposed to overvoltages caused by lightning strikes, switching operations, and other transient phenomena. Nonlinear surge protectors (NSPs) are a key solution to safeguard electrical equipment and maintain network stability. The type of network neutral—isolated or grounded—significantly affects protection strategies and NSP design.

Trends in surge protection:

– Network-specific design: NSPs must be optimized depending on whether the network has an isolated or grounded neutral;

– Improved reliability: development of NSPs with enhanced response to both lightning and switching overvoltages;

– Mathematical modeling: electrical and thermal processes are simulated to predict

NSP behavior under extreme conditions;
– Condition monitoring: sensors and smart monitoring systems detect degradation and prevent failures.

Design and modeling considerations:
Accurate modeling of NSPs allows engineers to:
– predict voltage distribution and thermal stress;
– evaluate performance during repeated overvoltage events;
– optimize materials and geometries to extend NSP lifespan.

Operational aspects:
– Lightning overvoltages: NSPs rapidly absorb transient spikes, protecting transformers and other critical equipment;
– Switching overvoltages: NSPs must withstand repetitive stress without significant degradation;
– Maintenance strategies: monitoring and timely replacement of NSPs improve overall network reliability.

Modern surge protection requires a combination of tailored design, accurate modeling, and proactive operation. By considering network neutral type and advanced NSP technologies, electrical networks can achieve higher safety, reliability, and resilience against transient overvoltages.

УДК 620.9
Політаєв Д.С.[1], Братковська К.О. [2]
[1] асп. НУ «Запорізька політехніка»
[2] доц. НУ «Запорізька політехніка»

ЕФЕКТИВНІСТЬ РЕГУЛЮВАННЯ ГРАФІКА НАВАНТАЖЕННЯ ПРОМИСЛОВОГО ПІДПРИЄМСТВА

Динамічна нестабільність цінових індикаторів на сучасних енергетичних ринках та жорсткі вимоги до декарбонізації промисловості зумовлюють необхідність переходу від пасивного споживання до активних стратегій керування попитом, де ключову роль відіграють системи накопичення енергії (ESS). Функціонування ESS базується на принципах тарифного арбітражу та трансформації графіків навантаження, що дозволяє акумулювати енергетичний ресурс у періоди мінімальної вартості та вивільняти його під час цінових піків, забезпечуючи пряму мінімізацію витрат та стабілізацію параметрів мережі. Стрімка еволюція електрохімічних технологій та впровадження інтелектуального ПЗ трансформували накопичувачі з допоміжного інструменту в критичний актив промислової енергосистеми.

Сучасні наукові дослідження зосереджені на аналізі алгоритмів для оптимізації режимів експлуатації літій-іонних масивів, впровадженні методів

"Peak Shaving" (зрізання піків) та інтеграції ESS із локальною генерацією на базі відновлюваних джерел енергії. Ефективність таких рішень безпосередньо залежить від точності прогнозних моделей моніторингу в реальному часі та врахування нелінійних факторів деградації акумуляторів через глибокий аналіз їхнього життєвого циклу. У синергії з концепціями «Smart Grid» та розвитком твердотільних накопичувачів, системи зберігання формують фундамент для побудови адаптивних та відмовостійких енергетичних систем, здатних нівелювати вплив зовнішніх ринкових коливань та забезпечувати сталий розвиток індустріального сектору.

Оскільки графік електроспоживання промислового підприємства характеризується високою динамікою та нерівномірністю, що призводить до нераціонального використання потужності мережевих елементів, ключовим показником ефективності регулювання навантаження є коефіцієнт заповнення добового графіка k_3. Математично він визначає ступінь наближення реального споживання до максимально можливого при заданій піковій потужності та розраховується за формулою:

$$k_3 = \frac{p_{cp}}{P_{max}} = \frac{\sum_{i=1}^{n} W_i}{n * P_{max}},$$

де p_{cp} – середня потужність споживання за добу, кВт; P_{max}– максимальне значення активної потужності у години пікових навантажень, кВт; W – обсяг електричної енергії, спожитої за кожну і-ту годину, кВт·год; n – кількість розрахункових інтервалів (для добового циклу n=24).

Для максимізації показника k_3 необхідно мінімізувати амплітуду коливань навантаження шляхом перерозподілу потужності. Це досягається через застосування систем накопичення енергії (ESS), які функціонують у режимах «Peak Shaving» (зрізання піків) та «Valley Filling» (заповнення впадин). Технічна задача управління полягає у визначенні оптимальних моментів перемикання режимів зарядки/розрядки накопичувачів. Для цього доцільно аналізувати функцію навантаження P(t) та визначати точки екстремумів, де похідна функції дорівнює нулю.

Для забезпечення точності регулювання в реальному часі застосовуються методи статистичного моделювання та регресійного аналізу, які дозволяють згладжувати випадкові флуктуації споживання. Використання прогнозних моделей на базі нейронних мереж дає змогу ідентифікувати циклічні патерни навантаження та адаптивно коригувати роботу ESS. Такий підхід дозволяє оптимізувати операційні стратегії накопичувачів, максимізуючи коефіцієнт k_3 та забезпечуючи рівномірне завантаження силового обладнання підприємства.

Оцінка ефективності впровадження систем накопичення енергії (ESS) на базі коефіцієнта заповнення графіка навантаження k_3 підтверджується результатами експлуатації промислових мікромереж [3]. Математичне зниження максимальної потужності P_{max} у знаменнику розрахункової формули дозволяє не лише згладити криву попиту, а й експоненціально зменшити втрати енергії, оскільки величина струму має нелінійний зв'язок із втратами потужності в кабельних лініях [1].

Практичне застосування акумуляторних систем (BESS) на промислових об'єктах демонструє суттєве покращення профілю навантаження. Оптимізація режимів заряду-розряду, яка полягає у заповненні нічних мінімумів та зрізанні денних піків, дозволяє підвищити базовий коефіцієнт k_3 із типових 40–69% до понад 90% [3]. Це свідчить про максимально ефективне використання встановленої потужності трансформаторів та генеруючого обладнання протягом усієї доби.

Стратегічне розгортання ESS сприяє зниженню фактичного значення пікової потужності P_{max}у середньому на 15–32% залежно від ємності батарей, що безпосередньо зменшує плату за замовлену потужність [3]. Динамічне коригування піків також забезпечує економічну вигоду, скорочуючи загальні витрати підприємства на електроенергію на 13,8–22,2% щомісяця [2]. Завдяки вирівнюванню графіка та зростанню k_3 підвищується технічна стабільність системи: існуюче обладнання працює без критичних перевантажень, що дозволяє уникнути передчасної та вартісної модернізації розподільчих мереж [1]. Крім того, оптимізація генеруючих потужностей за рахунок акумуляторів має позитивний екологічний вплив. Відмова від використання резервних дизель-генераторів у години максимального навантаження знижує рівень викидів CO_2 на 8–22,9% [2].

Таким чином, використання коефіцієнта k_3 як цільової функції доводить, що згладжування графіка навантаження є стратегічним інструментом для підвищення надійності, екологічності та загальної рентабельності сучасних промислових енергосистем.

Запропонована методологія оптимізації систем накопичення енергії (ESS) на базі коефіцієнта заповнення графіка k_3 забезпечує промисловим підприємствам суттєве зниження експлуатаційних витрат. Збільшення k_3шляхом зменшення пікового попиту (P_{max}) ефективно розвантажує енергомережу та підвищує її загальну стабільність. Поєднання математичного згладжування профілю навантаження з прогнозуванням цін та механізмами управління попитом максимізує фінансову вигоду підприємства, насамперед за рахунок зниження витрат на спожиту активну електроенергію та оптимізації плати за її розподіл. Важливою складовою є також екологічність рішення – оптимізація дозволяє зменшити залежність від викопного палива в години максимальних навантажень.

Запропонований підхід є масштабованим та легко адаптується до специфіки різних галузей. Загалом, використання ESS доводить свою критичну роль у сучасній трансформації промислового енергоменеджменту, поєднуючи економічну доцільність, надійність та сталий розвиток.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Rana M. M. et al. A Review on Peak Load Shaving in Microgrid—Potential Benefits, Challenges, and Future Trend // Energies. – 2022. – Т. 15. – № 6. – С. 2278.

2. Shakil S. M., Hossain A., Ullah M. S. Optimal BESS Management for Peak Shaving Integrating Solar PV on Industrial Load // Saudi Journal of Engineering and Technology. – 2025. – Т. 10. – № 12. – С. 601-613.

3. Amir A. et al. Load Factor Improvement in a Standalone Microgrid using Battery Energy Storage System // 2022 3rd International Conference on Smart Grid and Renewable Energy (SGRE). – Doha, Qatar: IEEE, 2022. – P. 1-6.

УДК 621.3

Kulagin D.O.[1], Kulagina N.A.[2]
[1] prof. of the National University “Zaporizhzhya Polytechnic”
[2] engineer at “Iskra” innovation complex utility enterprise

METHODOLOGICAL FRAMEWORKS FOR MODERNIZING ELECTRICAL NETWORKS AND SYSTEMS

Modern energy systems are undergoing a significant transformation due to the development of technologies, decentralization of energy supply, integration of renewable energy sources, and increasing demands for the reliability and flexibility of power grids.

Trends in the development of power networks:

– Digitalization of networks: the use of smart meters, control systems (SCADA), sensors, and IoT technologies;

– Decentralization: the transition from centralized generation to microgrids and local energy sources;

– Integration of RES (renewable energy sources): solar, wind, and bioenergy installations require grid adaptation to unstable generation;

– Energy storage: the use of battery systems to balance the load;

– Flexible demand-side management (DSM).

Smart Grid

Smart Grid is an "intelligent network" that includes:

– two-way communication between consumers and suppliers;

– integration of distributed energy sources;
– increased efficiency, reliability, security, and resilience.

Microgrids

Microgrids are local energy systems that can operate autonomously or as part of a general network. They enhance energy security, especially in critical infrastructure.

The role of artificial intelligence and big data:
– demand and generation forecasting;
– optimization of load and network management;
– real-time detection of faults and malfunctions.

With the advancement of digitalization, the probability of cyberattacks increases, making data protection, secure information transmission, and system backup crucial.

Challenges and prospects:
– modernization of outdated infrastructure;
– integration of new technologies with minimal costs;
– increased resilience to climate change and emergency situations.

Modern power networks are complex and dynamic systems that require innovation, flexibility, and high reliability. The transition to Smart Grid and the development of microgrids are key steps toward the energy systems of the future.

УДК 621.311.1
Мартиш Д.О.[1], Федоша Д.В.[2]
[1] асп. НУ «Запорізька політехніка»
[2] доц. НУ «Запорізька політехніка»

ТЕХНОЛОГІЇ SMART GRID В УКРАЇНІ: ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТА ГНУЧКОСТІ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

Трансформація електроенергетичної системи України в умовах воєнних ризиків, масових пошкоджень інфраструктури та активної децентралізації генерації зумовила необхідність переходу до сучасних цифрових технологій управління [1]. Концепція Smart Grid (розумних мереж) розглядається як ключовий інструмент підвищення надійності, гнучкості та енергоефективності електропостачання промислових підприємств [2].

Промислові споживачі стикаються з нестабільністю живлення, високою часткою нелінійних навантажень, інтеграцією власних розподілених джерел енергії (ВДЕ) та вимогою забезпечення безперервності технологічних процесів. Традиційні радіальні схеми електропостачання вже не забезпечують опе-

ративного реагування на зміни режимів, що призводить до тривалих відключень, погіршення якості електричної енергії та зростання технічних втрат.

Технології Smart Grid забезпечують двосторонній цифровий обмін даними в реальному часі, автоматизований моніторинг параметрів мережі, прогнозне керування навантаженням, інтеграцію систем накопичення енергії (BESS), адаптивну роботу релейного захисту й автоматики, а також можливість переходу в острівний режим.

Станом на 2025–2026 роки в Україні вже реалізуються практичні кроки впровадження Smart Grid. Компанія ДТЕК повністю оцифрувала мережі Київщини з використанням цифрового двійника (digital twin) [3]. Триває розгортання систем Smart metering, будівництво великих накопичувачів енергії (близько 500 МВт у 2025 році) та пілотних мікромереж на промислових майданчиках. Аналогічні проєкти виконуються в Одеській, Харківській та Дніпропетровській областях [4].

Цифровий двійник електричної мережі промислового підприємства (візуалізація реального часу: моніторинг навантаження, параметрів ЯЕЕ, рівня реактивної потужності, прогнозування аварійних ситуацій та автоматичне формування рекомендацій щодо перекомутації).

Схема промислової мікромережі з інтеграцією ВДЕ та систем зберігання енергії (складається з: сонячні/вітрові установки → інвертори → BESS → навантаження підприємства → мікромережний контролер → зв'язок з основною мережею; можливість автоматичного переходу в islanding-режим).

Новий підхід полягає в обґрунтуванні архітектури застосування принципів Smart Grid саме для промислових систем електропостачання України в умовах високої частки розподіленої генерації та підвищених ризиків. Запропоновано комплексне рішення, що поєднує моніторинг якості електричної енергії з адаптивними алгоритмами керування мікромережами та автоматичною компенсацією реактивної потужності.

Впровадження технологій Smart Grid на промислових підприємствах забезпечує:

- зниження показників SAIDI та SAIFI у 3–7 разів;
- гарантоване живлення критичних технологічних ліній в острівному режимі;
- оптимізацію балансу генерації та споживання в реальному часі;
- зменшення втрат електроенергії на 10–25 %;
- підвищення якості електричної енергії та коефіцієнта потужності;
- можливість участі підприємств у ринку допоміжних послуг (ancillary services).

На теперішній технології Smart Grid є стратегічно важливим напрямом модернізації систем електропостачання промислових підприємств України,

що значно підвищує їхню енергетичну стійкість, гнучкість та конкурентоспроможність у сучасних умовах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. IEA. Empowering Ukraine Through a Decentralised Electricity System. 2024. URL: https://www.iea.org/reports/empowering-ukraine-through-a-decentralised-electricity-system (дата звернення: 01.04.2026).

2. Hrytsiuk I., Volynets V., Hrytsiuk Yu., Bandura I., Komenda N. Prospects for the integration of distributed energy sources into the Ukrainian power grid // Machinery & Energetics. 2025. Vol. 16, No. 1. P. 130-145.

3. Smart Grid in Ukraine: What is it, why is it needed, and when will it be introduced? URL: https://dia.dp.gov.ua/en/smart-grid-in-ukraine-what-is-it-why-is-it-needed-and-when-will-it-be-introduced/ (дата звернення: 01.04.2026).

4. POWER DISTRIBUTION AND SMART GRIDS - DTEK // Ukraine Energy Initiative. URL: https://ukraineenergyinitiative.com/smartgrids-dtek-2/ (дата звернення: 01.04.2026).

УДК 621.311.1

Житницький С.О.[1], Федоша Д.В.[2]
[1] асп. НУ «Запорізька політехніка»
[2] доц. НУ «Запорізька політехніка»

КОРОТКОСТРОКОВЕ ПРОГНОЗУВАННЯ СПРАЦЬОВУВАННЯ ЗАХИСТУ В РОЗПОДІЛЬЧИХ ПРИСТРОЯХ 6-35 КВ З ВИКОРИСТАННЯМ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ДАНИХ

У сучасних умовах підвищених вимог до надійності електропостачання особливої уваги набувають питання своєчасного виявлення та запобігання аварійним режимам у розподільчих мережах середньої напруги (6–35 кВ). Механізмом забезпечення стабільної роботи таких мереж є система релейного захисту, від коректності та швидкодії якої залежить запобігання пошкодженням обладнання та втратам електроенергії.

Застосування технологій інтелектуального аналізу даних (Data Mining, Machine Learning [1]) дозволяє перейти від реактивного до проактивного управління аварійністю, передбачаючи ймовірність спрацювань захисту на підставі попередніх трендів у режимах роботи мережі.

Новий підхід полягає у побудові структурованого підходу до формалізації ознак з телеметрії PowerLogic T300 та використанні Random Forest [2] для передбачення спрацювань, що дозволяє забезпечити проактивне технічне обслуговування.

Для цього використовувались синтетичні телеметричні дані, на основі раніше зібраних телемеханічним пристроєм PowerLogic T300, встановленим на підстанціях розподільчої мережі напругою 6–35 кВ. Дані охоплювали часові ряди змін струму, напруги, статусів вимикачів, сигналів аварій, попереджень і команд керування. Загальний обсяг вибірки становив близько 120 000 записів з інтервалом дискретизації в 500-1000мс (Δt).

Для даних виконано очищення від аномальних або некоректних значень, а також побудову нових ознак (features), таких як: темп зміни струму (ΔI/Δt) (1), частота появи аварійних сигналів за вікно часу (2), статуси вимикачів у вигляді бінарного вектора, попередні значення за фіксовану кількість кроків (відстаючі ознаки, лагування).

$$\left.\frac{dI_a}{dt}\right|_{t_i} \approx \frac{I_a(t_i)-I_a(t_{i-1})}{t_i-t_{i-1}}, \quad (1)$$

де Ia(ti) – миттєве значення струму фази A у момент часу ti; ti – мітка часу в мілісекундах.

$$f_{trip}(t_i) = \sum_{j=i-W+1}^{i} \delta_{trip}(t_j), \quad (2)$$

де $\delta_{trip(}$tj) = 1, якщо в момент часу tj зареєстрована подія типу "Trip";W - розмір скользячого вікна в кількості точок (наприклад, 60 для 1Hz); ftrip(ti) - кількість trip-подій за останнє вікно.

Модель короткострокового прогнозування реалізована, як задача бінарної класифікації на основі ознак, отриманих із синтетичних телеметричних даних, 5.4% з яких – позитивні (спрацювання захисту). Для забезпечення збалансованості моделей застосовано стратифіковане розділення на тренувальний (70%), валідаційний (15%) і тестовий (15%) набори. Як базовий алгоритм обрано Random Forest [3], оптимізований із використанням GridSearchCV. Найкращі результати отримано при параметрах: n_estimators = 100, max_depth = 8, min_samples_split = 4, criterion = 'gini'. Для врахування дисбалансу класів та покращення метрик якості, поріг класифікації було знижено до 0.35 [4]. Це дозволило підвищити F1-score [5] до 0.91 на тестовому наборі.

Модель продемонструвала стабільність на всіх підмножинах даних, а її результативність оцінена за допомогою F1-метрики, що поєднує точність і повноту. Аналіз матриці помилок підтвердив здатність моделі ідентифікувати більшість спрацювань без значного зростання кількості хибних спрацьовувань.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на застосування інших алгоритмів рекурентних нейронних мереж (RNN/LSTM) для роботи з часовими послідовностями, використання справжніх телеметричних даних з ме-

режі підстанцій для валідації моделі та інтеграцію з хмарними SCADA-системами для автоматизованої діагностики.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1 Review of Machine Learning Applications to Power System Studies. Dr Eseosa Omorogiuwa - University of Port Harcourt, Ashiathah Ikposhi - Open Access Research Journal of Engineering and Technology Volume 6, July 2021. – pp. 35-44.

2 Forecasting the Short-Term Energy Consumption Using Random Forests and Gradient Boosting. Cristina Bianca Pop, Viorica Rozina Chifu, Corina Cordea, Emil Stefan Chifu, Octav Barsan. URL: https://arxiv.org/pdf/2207.11952 (дата звернення 03.04.2026).

3 Short-Term Load Forecasting Based on Optimized Random Forest and Optimal Feature Selection. Growth in global electricity demand is set to accelerate in the coming years as power-hungry sectors expand. URL: https://www.mdpi.com/1996-1073/17/8/1926 (дата звернення 03.04.2026).

4 Thresholding Classifiers to Maximize F1 Score. Zachary Chase Lipton, Charles Elkan, Balakrishnan Narayanaswamy. URL: https://www.researchgate.net/publication/262996346_Thresholding_Classifiers_to_Maximize_F1_Score (дата звернення 03.04.2026).

5 F*: an interpretable transformation of the F-measure. David HandPeter ChristenPeter ChristenNishadi Kirielle. URL: https://www.researchgate.net/publication/350084929_F_an_interpretable_transformation_of_the_F-measure (дата звернення 03.04.2026).

УДК 621.311

Kulagin D.O.[1], Shram O.O.[2]
[1] prof. of the National University “Zaporizhzhia Polytechnic”
[2] student of group E-112, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”

GLOBAL TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF MICROGRIDS

Microgrids are among the most actively developing areas of modern energy systems. As distributed generation expands and the share of renewable energy sources grows, microgrids are increasingly recognised as a key element of stable energy infrastructure. Their ability to operate both in grid-connected and islanded modes makes them applicable across a wide range of contexts — from remote rural communities to urban industrial facilities. The growing volume of scientific publications, regulatory initiatives, and pilot implementations worldwide confirms that

microgrids are transitioning from an experimental concept to a practical energy solution.

European scientific discourse frames microgrids primarily as instruments of decarbonisation and climate neutrality. Considerable attention is devoted to Peer-to-Peer energy trading between households, smart metering, and the integration of microgrids into broader smart city ecosystems. The overriding priorities are economic efficiency, maximisation of renewable energy sources penetration, and reduction of CO2 emissions. The EU regulatory environment is gradually shaping legal frameworks for energy communities, although harmonisation of technical standards across member states remains an ongoing challenge.

In the context of large-scale destruction of centralised energy infrastructure caused by armed aggression, Ukrainian research has sharply pivoted towards energy stability. Current studies examine fast islanding algorithms, stabilisation of local systems under power deficit conditions, and hybrid configurations combining solar generation with battery storage. Ukrainian researchers are actively developing and analysing hybrid microgrid configurations, accumulating practical operational experience that contributes to the broader scientific understanding of decentralised energy systems under challenging conditions.

The analysis of scientific literature indicates that microgrid development is driven by different priorities across regions, yet follows a common trajectory towards energy decentralisation. Both European and Ukrainian research demonstrate that microgrids offer tangible benefits in terms of stability, flexibility and integration of renewable generation. Further advancement in this field requires coordinated efforts in standardisation, regulatory frameworks, and cross-disciplinary research combining technical and economic perspectives.

УДК 111

Міщенко В.Ю.[1], Ведмедко Д.А.[2]
[1] старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. Е-514 НУ «Запорізька політехніка»

ЩОДО МОЖЛИВОСТІ МАНЕВРУВАННЯ ПОТУЖНІСТЮ РУДНОТЕРМІЧНОЇ ПЕЧІ

Феросплавна галузь економіки України відноситься до енергоємних виробництв. Головними споживачами електричної енергії є руднотермічні печі, що мають великий діапазон потужностей. В нашій країні сьогодні існують два великі підприємства з виробництва феросплавної продукції – АТ «Запорізький завод феросплавів» та АТ «Нікопольський завод феросплавів», що відповідно знаходяться в зазначених містах. Перший завод використовує печі

типу РКО та РКЗ різної номінальної потужності від 5 МВ·А до 27,6 МВ·А, однак найбільша кількість (понад 12 штук) печей РКО-7. Інше підприємство має потужні печі типу РПЗ-63 та РКГ-75 у загальній кількості 14 штук, а також 6 печей типу РКЗ-16,5. Незважаючи на те, що на зазначених підприємствах використовують велике різноманіття потужностей руднотермічних агрегатів, конструктивно вони відрізняються лише геометричними розмірами, а принцип роботи та додаткове обладнання є однаковим, що наведено вище.

Через масовані та постійні атаки на енергосистему України все частіше зазнають обмежень в електричній потужності не тільки побутові споживачі, а й промисловість і бізнес. Це в свою чергу впливає на стабільну роботу зазначених вище заводів, оскільки процес отримання феросплавів здебільшого є неперервним.

Тому виникає необхідність провести розрахункові дослідження на комплексній моделі круглої руднотермічної печі щодо можливості маневрування (збалансування) електричною потужністю підприємства в години її обмеження за допомогою зміни режиму роботи таких потужних споживачів як феросплавні печі з метою енергоефективного використання наданих потужностей підприємству.

УДК 621.3
Кулагін Д.О.[1], Пирог І.Ю.[2]
[1] проф. НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. НУ «Запорізька політехніка»

СУЧАСНІ МЕТОДИ ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

Проєктування систем електропостачання сучасних промислових підприємств сьогодні базується на принципах інтелектуалізації, гнучкості та декарбонізації. Основним вектором розвитку є перехід від традиційних односторонніх мереж до концепції Smart Grid, що передбачає впровадження активних елементів керування та глибоку цифровізацію всіх вузлів. Використання цифрових двійників на етапі розробки дозволяє інженерам моделювати складні динамічні режими, прогнозувати реакцію мережі на пускові струми потужного обладнання та оптимізувати конфігурацію захистів ще до початку монтажних робіт. Важливу роль у цьому процесі відіграє стандарт IEC 61850, який перетворює класичну підстанцію на цифровий вузол, де замість кілометрів мідних кабелів використовується оптична шина процесу, що радикально підвищує точність вимірювань та надійність передачі сигналів.

Паралельно з цифровізацією відбувається масштабна децентралізація генерації. Сучасні промислові об’єкти все частіше проєктуються як автоном-

ні Microgrids, що включають власні відновлювані джерела енергії, такі як дахові сонячні електростанції або вітрові турбіни. Це потребує інтеграції систем накопичення енергії (BESS), які не лише забезпечують безперебійність живлення під час аварій у зовнішній мережі, а й дозволяють підприємству ефективно керувати власним споживанням, зрізаючи пікові навантаження та знижуючи витрати на оплату за потужність. Такий підхід робить енергосистему заводу стійкою до зовнішніх блекаутів та сприяє виконанню екологічних нормативів щодо зниження вуглецевого сліду продукції.

Питання якості електроенергії в сучасному проєктуванні стає критичним через масове використання частотно-регульованих приводів та іншої нелінійної електроніки, яка вносить гармонічні спотворення в мережу. Замість застарілих пасивних фільтрів сьогодні пріоритет надається активним фільтрам гармонік та системам динамічної компенсації реактивної потужності. Ці пристрої здатні в реальному часі коригувати параметри мережі, запобігаючи перегріву трансформаторів та збоям у роботі мікропроцесорної техніки. Моніторинг якості енергії стає невід'ємною частиною систем диспетчеризації, дозволяючи виявляти приховані проблеми на ранніх стадіях та оптимізувати енерговитрати всього виробництва.

Ще одним важливим напрямком є перехід до модульних та екологічно безпечних рішень. Використання шинопровідних систем замість традиційних кабельних ліній забезпечує необхідну гнучкість: при зміні технологічного циклу або перестановці верстатів підключення нових споживачів відбувається максимально швидко та без прокладання нових трас. У сфері комутаційної апаратури спостерігається чіткий тренд на відмову від елегазу (SF6) на користь вакуумних технологій та чистих газових сумішей, що мінімізує екологічні ризики. Таким чином, сучасне проектування енергосистем — це створення адаптивного, енергоефективного та безпечного середовища, де цифрові технології працюють у синергії з екологічними енергетичними рішеннями.

УДК 621.316.925
Шрам О.А.[1], Брабець О.С.[2]
[1] зав. каф. НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. Е-115м. НУ «Запорізька політехніка»

ДИСТАНЦІЙНИЙ ЗАХИСТ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ

Враховуючи значну протяжність повітряних лінії (ПЛ) та їх вразливість до аварійних режимів порівняно з іншими компонентами енергосистеми, забезпечення надійності функціонування магістральних та розподільних електричних мереж є критично важливим завданням для сучасної енергети-

ки.. Статистика свідчить, що більшість пошкоджень у силових мережах припадає саме на ПЛ. Основними причинами аварій є атмосферні впливи, механічні пошкодження та термічні перевантаження. У цьому контексті релейний захист виступає як основний механізм локалізації та усування аварійних режимів, де дистанційний захист (ДЗ) посідає провідне місце завдяки своїй селективності, швидкодії та здатності функціонувати на основі локальних вимірювань [1].

Принцип дії дистанційного захисту заснований на визначенні відстані до місця короткого замикання (КЗ) шляхом вимірювання повного опору петлі пошкодження. Оскільки питомий опір лінії є практично постійною величиною, виміряний імпеданс прямо пропорційний фізичній відстані від місця встановлення реле до точки замикання. Такий підхід забезпечує вищу селективність порівняно зі струмовими захистами, оскільки зона дії дистанційного захисту менше залежить від конфігурації мережі та режимів роботи джерел живлення.

Історично перші дистанційні реле використовували кругові характеристики (Mho), які реалізовувалися на базі індукційних або напівпровідникових елементів. Характеристика Mho забезпечує природну направленість і є ефективною для захисту довгих ліній, проте вона має суттєві обмеження при виникненні замикань через перехідний опір електричної дуги.

На комплексній площині $R - X$ (активний опір — реактивний опір) характеристика Mho відображається у вигляді кола, що проходить через початок координат. Якщо обчислений опір потрапляє всередину цього кола, реле визначає, що пошкодження сталося в межах його зони дії, і подає сигнал на відключення.

З розвитком мікропроцесорної техніки домінуючою стала полігональна характеристика. Вона дозволяє незалежно налаштовувати чутливість по активній (R) та реактивній (X) осях, що забезпечує краще охоплення зони неметалевих замикань, особливо на коротких лініях [2].

Сьогодні релейний захист в Україні знаходиться на етапі переходу від електромеханічних та напівпровідникових панелей до інтелектуальних електронних пристроїв (IED). Синхронізація ОЕС України з Європейською мережею операторів систем передачі електроенергії (ENTSO-E) висуває підвищені вимоги до селективності та швидкодії ДЗ. Для ПЛ 110–750 кВ в Україні стандартним залишається використання ступеневого дистанційного захисту від міжфазних КЗ та ступеневого струмового захисту нульової послідовності від КЗ на землю.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Alzyoud A. R. Distance protection of overhead transmission lines review. *International Journal of Power Systems*. 2022. Vol. 7. P. 85–94. URL: https://www.iaras.org/iaras/filedownloads/ijps/2022/010-0008(2022).pdf .

2. Liang F., Jeyasurya B. Transmission Line Distance Protection Using Wavelet Transform Algorithm. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2004. Vol. 19, no. 2. P. 545–553. URL: https://doi.org/10.1109/tpwrd.2003.823188 .

УДК 621.31:355.4(477)

Братковська К.О.[1], Лемешко Д.Р. [2]
[1] канд. екон. наук, доцент НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. Е-515 НУ «Запорізька політехніка»

ОСОБЛИВОСТІ ПРОЕКТУВАННЯ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ОБ'ЄКТІВ У ВОЄННИЙ ЧАС

У воєнний час питання електропостачання стало особливо важливим, тому що без електроенергії сьогодні не може нормально працювати майже жоден об'єкт. Це стосується житлових будинків, лікарень, підприємств, систем зв'язку, водопостачання, транспорту та інших важливих об'єктів. Через бойові дії, обстріли та пошкодження енергетичної інфраструктури можуть виникати аварійні відключення, перебої в роботі мереж і навіть повне знеструмлення окремих районів або будівель. Саме тому під час проектування систем електропостачання у воєнний час потрібно враховувати не тільки звичайні технічні вимоги, а ще й можливі аварійні ситуації.

Головне завдання проектування електропостачання в таких умовах — зробити так, щоб об'єкт міг працювати навіть тоді, коли основна електромережа пошкоджена або тимчасово не працює. Тобто система повинна бути більш надійною, стійкою до пошкоджень і, по можливості, автономною.

У мирний час при проектуванні електропостачання більше уваги приділяють економічності, правильному вибору обладнання, навантаженням та енергоефективності. Але у воєнний час цього вже недостатньо. Тут на перший план виходять такі вимоги: надійність; резервне живлення; захист обладнання; стійкість до пошкоджень; швидке відновлення роботи; автономність.

Однією з головних особливостей проектування у воєнний час є резервування електропостачання. Це означає, що крім основного підключення до електромережі об'єкт повинен мати ще й запасне джерело живлення. Найчастіше для цього використовують дизельні генератори; бензинові генератори; акумуляторні батареї; джерела безперебійного живлення (ДБЖ); сонячні панелі з накопиченням енергії; мобільні електростанції.

Але резервне живлення зазвичай не роблять для всього об'єкта одразу, тому що це дорого і не завжди потрібно. Найчастіше до резерву підключають тільки найважливіше: аварійне освітлення, серверні, системи зв'язку, насоси, сигналізацію, вентиляцію укриттів, медичне обладнання та інші критичні споживачі.

Також дуже важливою частиною такої системи є автоматичне введення резерву (АВР). Це спеціальний пристрій, який автоматично переключає живлення з основної мережі на резервну, якщо зникає напруга. Завдяки цьому електропостачання відновлюється дуже швидко, що особливо важливо для лікарень, серверних приміщень, диспетчерських і командних пунктів.

Ще одна особливість — це підвищені вимоги до самої електричної мережі. У воєнний час лінії електропередач або кабелі можуть бути пошкоджені через вибухи, уламки чи руйнування. Тому при проектуванні потрібно робити систему такою, щоб навіть при пошкодженні однієї її частини інша могла продовжувати працювати. Для цього використовують: кабельні лінії замість повітряних, де це можливо; прокладання кабелів під землею або в захисних каналах; окремі маршрути для основного та резервного живлення; поділ мережі на окремі ділянки; додаткові секції у щитових. Це дає можливість зменшити ризик повного знеструмлення всього об'єкта. Якщо одна частина мережі вийде з ладу, інші можуть продовжити працювати.

Окрему увагу потрібно приділяти захисту електрообладнання. У воєнний час воно повинно бути не лише справним, а й максимально захищеним. Це стосується трансформаторів, генераторів, щитових, кабельних трас, акумуляторних систем та іншого обладнання. При проектуванні потрібно передбачити захист від коротких замикань; захист від перевантаження; захист від перенапруг; заземлення; блискавкозахист; протипожежні заходи; фізичний захист обладнання від уламків та ударної хвилі. У деяких випадках найважливіше обладнання краще розміщувати у підвальних або захищених приміщеннях. Це особливо важливо для серверних, диспетчерських, систем управління та об'єктів цивільного захисту.

Ще одна дуже важлива вимога — це автономність роботи. У воєнний час часто бувають довгі відключення, тому важливо не тільки мати генератор або акумулятори, а й правильно використовувати електроенергію. Через це під час проектування потрібно передбачати енергоощадне освітлення; автоматичне відключення другорядних навантажень; поділ споживачів на головні та другорядні; використання сучасного енергоефективного обладнання; контроль витрат електроенергії. Це допомагає довше підтримувати роботу об'єкта в аварійному або автономному режимі.

Отже, проектування електропостачання об'єктів у воєнний час є більш складним і відповідальним, ніж у мирний період. У таких умовах головне — це не тільки нормальна робота системи, а й її надійність, захищеність, наявність резерву та можливість автономної роботи. Саме завдяки правильному проектуванню можна забезпечити стабільну роботу важливих об'єктів навіть у складних умовах воєнного часу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). – 5-те вид., перероб. і допов. – Харківав: Форт, 2017. – 760 с.

2. ДБН В.2.5-23:2010. Проектування електрообладнання об'єктів цивільного призначення. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. – 109 с.

УДК 692.92

Махлін П.В [1], Сіра В.А.[2], Щербина О.О.[2]
[1] доц. НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. Е-115м НУ «Запорізька політехніка

ДОСЛІДЖЕННЯ АВАРІЙНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ГІРНИЧО-ЗБАГАЧУВАЛЬНОГО КОМБІНАТУ

Технологічний процес видобутку та збагачення залізорудних концентратів гірничо-збагачувального комбінату є дуже енергоємним. Витрати на електроенергію складають значну частину собівартості продукції. Система електропостачання комбінату складна, а тому забезпечення її безперебійної та надійної роботи є актуальною задачею при різних схемах живлення споживачів підприємства, а також при різних режимах роботи Каховської ГЕС в залежності від сезону та часу доби.

В роботі проведено аналіз можливих режимів роботи системи електропостачання та вибрані схеми для дослідження аварійних режимів при коротких замиканнях (КЗ) на Криворізькій ТЕС, Каховській ГЕС та головній знижувальній підстанції гірничо-збагачувального комбінату ГПП-4. При проведені розрахунків струмів КЗ на шинах 150 кВ Криворізької ТЕС розглядалися різні можливі режими роботи Каховської ГЕС (тобто різна кількість працюючих гідроагрегатів), різні схеми розподільних пристроїв 150 кВ на Криворізькій ТЕС (при включених та відключених міжшиних вимикачів, тобто в робочому та в після аварійних режимах), при різній кількості працюючих агрегатів ТЕС. Крім того розраховані струми КЗ на секціях шин Каховської ГЕС, при КЗ на секціях збірних шин 150 кВ ГПП-4 при робочій, ремонтній та після аварійних схемі електропостачання.

Для проведення розрахунків струмів КЗ розроблені схемі заміщення. Як показали результати досліджень рівень струмів однофазних та трифазних КЗ дуже високий, причому рівень струмів однофазних КЗ перевищують рівень струмів трифазних КЗ. Побудовані залежності струмів КЗ в елементах схеми електропостачання від режимів роботи гідроагрегатів ГЕС.

Розглянуті засоби зниження рівня струмів аварійних режимів: розглянута можливість використання ділильної автоматики - автомату зниження потужності, що діє на відключення міжшинних та секційних вимикачів на шинах 150 кВ, в результаті чого зменшувалась кількість ланцюгів підживлення КЗ.

Крім того проведений вибір та розрахунок релейного захисту для підвищення надійності та безперебійності роботи системи електропостачання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Правила улаштування електроустановок: Глава 4.2. Розподільчі установки і підстанції напругою понад 1кВ / Мінпаливенерго України. К: НПЦР, 2017 – С. 473- 530.

2. Півняк Г.Г. Перехідні процеси в системах електропостачання / Г.Г. Півняк, В.М. Винославський, А.Я.Рибалко, Л.І.Несен. –.Дніпропетровськ Національна гірнича академія України. 2000.- 573с..

УДК 620.9:005.52

Бірківська К.Ю.[1], Ліуш Ю.Б.[2]
[1] студ. гр. Е-513 НУ «Запорізька політехніка»
[2] доц. НУ «Запорізька політехніка»

ЕНЕРГЕТИЧНИЙ МЕНЕДЖМЕНТ НА ПІДПРИЄМСТВІ: АНАЛІЗ ВПЛИВУ НА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ЕКОЛОГІЧНІ ПОКАЗНИКИ

У сучасних умовах функціонування підприємств питання раціонального використання енергетичних ресурсів набуває особливої актуальності. Це обумовлено зростанням вартості енергоносіїв, підвищенням конкуренції та посиленням екологічних вимог [2, 4]. У зв’язку з цим впровадження енергетичного менеджменту розглядається як один із ключових інструментів підвищення енергоефективності та забезпечення сталого розвитку підприємств [1].

Енергетичний менеджмент являє собою систематичний процес моніторингу, аналізу, контролю та оптимізації використання енергоресурсів [1]. Його основною метою є зниження витрат енергії, підвищення ефективності її використання та мінімізація негативного впливу на довкілля [2]. Практика показує, що впровадження систем енергоменеджменту дозволяє досягти економії енергоресурсів у межах 5-20% навіть без значних капітальних інвестицій [2].

Система енергетичного менеджменту включає кілька взаємопов'язаних етапів: облік енергоспоживання, аналіз отриманих даних, планування заходів з енергозбереження та контроль результатів [1]. На початковому етапі здійснюється детальний облік використання енергії, що дозволяє ідентифікувати основні джерела втрат. Подальший аналіз спрямований на виявлення неефективних процесів, після чого розробляються та впроваджуються відповідні заходи. Завершальним етапом є оцінка ефективності реалізованих рішень і їх коригування.

Важливу роль у впровадженні енергетичного менеджменту відіграє енергоаудит - комплексна перевірка, яка дозволяє оцінити стан енергоспоживання підприємства та визначити потенціал енергозбереження [2]. На основі результатів енергоаудиту формуються практичні заходи, серед яких модернізація обладнання, оптимізація систем теплопостачання, оновлення теплових мереж та впровадження відновлюваних джерел енергії [3].

Енергетичний менеджмент безпосередньо впливає на економічні показники підприємства. Зменшення енергоспоживання призводить до зниження витрат на електроенергію та паливо, що підвищує загальну ефективність виробництва та конкурентоспроможність підприємства [2]. Крім того, раціональне використання енергії сприяє зменшенню технологічних втрат і оптимізації виробничих процесів.

Не менш важливим є екологічний аспект. Скорочення споживання традиційних видів палива, таких як вугілля, нафта та природний газ, веде до зниження викидів шкідливих речовин і парникових газів, зокрема CO_2 [4]. Використання відновлюваних джерел енергії додатково зменшує негативний вплив на навколишнє середовище [3]. Основними показниками екологічної ефективності є рівень викидів, обсяги енергоспоживання та кількість утворених відходів.

Аналіз впливу енергетичного менеджменту на діяльність підприємства доцільно розглядати через систему ключових показників енергоефективності та екологічності. Впровадження системи енергоменеджменту забезпечує формування керованого енергетичного балансу підприємства, що дозволяє перейти від реактивного до проактивного управління енергоспоживанням [1].

З точки зору енергоефективності, основний ефект проявляється у зниженні питомого енергоспоживання продукції, скороченні непродуктивних втрат енергії та підвищенні коефіцієнта використання енергоресурсів [2]. Важливою характеристикою є також стабілізація енергоспоживання, що свідчить про підвищення керованості технологічних процесів.

Екологічний ефект енергетичного менеджменту проявляється через зменшення інтенсивності викидів забруднюючих речовин на одиницю продукції [4]. Скорочення споживання викопних палив безпосередньо впливає на зниження викидів парникових газів, зокрема CO_2 [4]. Впровадження енергое-

фективних технологій і відновлюваних джерел енергії сприяє формуванню більш екологічно чистого виробництва [3].

Крім того, енергетичний менеджмент забезпечує інтеграцію енергетичних та екологічних аспектів у загальну систему управління підприємством, що відповідає сучасним європейським підходам до сталого розвитку [4].

Таким чином, аналітична оцінка підтверджує, що енергетичний менеджмент має комплексний вплив на підприємство, одночасно підвищуючи енергоефективність, знижуючи екологічне навантаження та покращуючи якість управлінських рішень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. International Organization for Standardization. ISO 50001:2018 Energy management systems - Requirements with guidance for use. 2018. URL: https://www.iso.org/standard/69426.html

2. International Energy Agency. Energy Efficiency 2023. URL: https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2023

3. International Renewable Energy Agency Synergies between Renewable Energy and Energy Efficiency. 2015. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2015/IRENA_C2E2_Synergies_RE_EE_paper_2015.pdf

4. European Parliament and Council. Directive 2012/27/EU of 25 October 2012 on energy efficiency. Official Journal of the European Union. 2012. L 315. P. 1–56. URL: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:32012L0027

УДК 621.311.243:621.311

Братковська К.О.[1], Богма А.О. [2]
[1] доц. НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. Е-514 НУ «Запорізька політехніка»

ВПЛИВ СЕС НА ЕНЕРГОСИСТЕМУ

Енергосистема - це сукупність електроенергетичних пристроїв та обладнання, які працюють у взаємно-узгодженому режимі та призначені для виробництва, передачі, розподілу, перетворення і споживання електричної та теплової енергії. В Україні функціонує об'єднана енергосистема, а з 16 березня 2022 року національна енергосистема України об’єдналася з європейською мережею операторів системи передачі електроенергії ENTSO-E. Синхронізація з ENTSO-E посилила енергетичну безпеку України і всього регіону. Українська електроенергія допомагала Європі позбутися залежності від російсь-

ких енергоносіїв, зменшуючи використання газу у виробництві електричної енергії. [1]

У світі активно розвивають і модернізують відновлювані джерела енергії, зокрема сонячні електростанції. В Україні кількість встановлених СЕС значно збільшилася за останні роки. Станом на 2024 рік нараховується 1369 сонячних електростанцій,[2] Вони зменшують навантаження на мережі в пікові години, знижують викиди вуглекислого газу, підвищують енергонезалежність споживачів та є відносно прості в підключенні до електромереж. Поряд з цим постає питання про негативний вплив на енергосистему, оскільки вони мають низькі коефіцієнти використання встановленої потужності (на рівні 12–20 %), непрогнозоване коливання обсягу виробництва.[3] Тобто, зростання частки сонячної генерації супроводжується, як позитивними, так і негативними впливами на енергосистему. У зв'язку з цим є потреба детально розглянути кожен вплив.

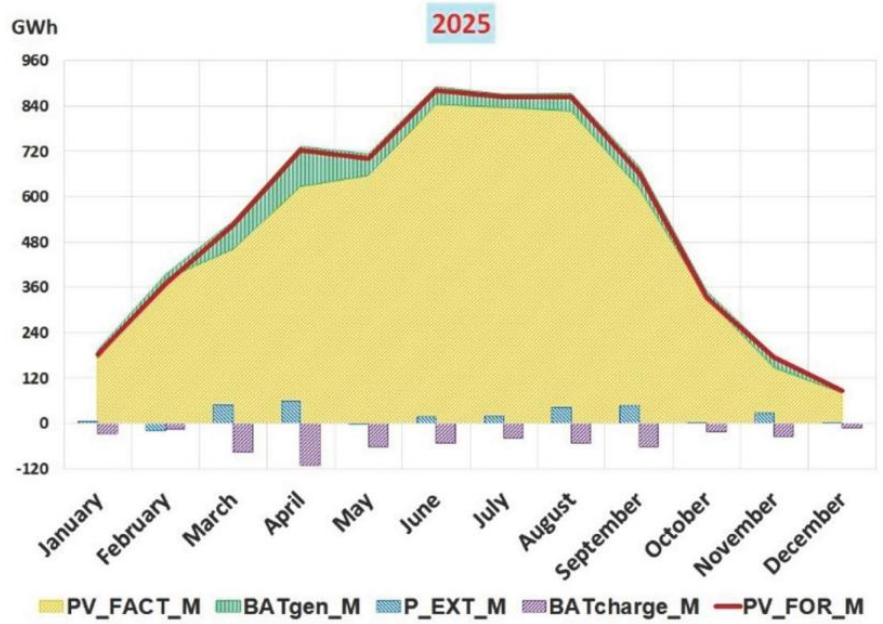


Рис. 1 – статистика прогнозованого та фактичного виробництва сонячної енергії за 2025 рік

Перш за все доцільно розглянути вплив СЕС на стабільність генерацію електроенергії. Виробництво сонячної енергії безпосередньо залежить від погодних умов та часу доби, створюючи профілі генерації, які змінюються

щохвилини. В Україні генерація коливається в межах від 1100 до 1500 кВт·год із кожного встановленого кіловату потужності на рік.[4] Різниця пов'язана з кількістю сонячних днів, тривалістю світлового дня та погодою в кожному регіоні. Наприклад, на півдні, де сонця більше та зима м'якше, показники вищі: одна одиниця потужністю 400 Вт може дати до 600 кВт·год на рік. У центральних областях близько 500-550 кВт·год, а на півночі та заході, де частіше похмуро та дні коротші, ближче до 450–500 кВт·год.[5] Отже, така варіативність генерації ускладнює прогнозування виробництва електроенергії, а звідси негативно впливає на стабільність роботи енергосистеми. На рис. 1 представлено порівняння прогнозованого (PV_FOR_M) та фактичного (PV_FACT_M) виробництва електроенергії СЕС за 2025 рік. З діаграми бачимо, що генерація має виражений сезонний характер: мінімальні значення спостерігаються у зимові місяці, де обсяги виробництва не перевищують 200 ГВт·год, тоді як у літній період досягають максимуму на рівні 850 ГВт·год, у весняно-літній період характеризується збільшенням як абсолютних обсягів виробництва, так і величини відхилень, що зумовлено високою мінливістю погодних умов [6]

Але, з іншої сторони встановлення СЕС гарантує незалежність електроенергії від центральних мереж, особливо у воєнний час. Так у разі пошкодження центральної мережі, у споживачів є додаткове живлення від сонця. Також, використання СЕС зменшує залежність від традиційних джерел енергії, таких як: нафта, вугілля, природний газ, ядерне паливо

Отже, сонячні електростанції мають як позитивний вплив на енергосистему, так и негативний. У зв'язку з цими впливами, можна зробити висновок, що інтеграція СЕС в енергосистему потребує модернізації та технічних рішень з удосконаленням для забезпечення стабільної роботи енергосистеми.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Інтеграція у європейську електромережу ENTSO-E [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://mev.gov.ua/reforma/intehratsiya-u-yevropeysku-elektromerezhu-entso-e (дата звернення: 10.04.2026).

2. Сонячна генерація: змінюються масштаб та географія об’єктів [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://ua-energy.org/uk/posts/tryfonivska-ses-foto-dtek (дата звернення: 10.04.2026).

3. Енергетична безпека України: методологія системного аналізу та стратегічного планування : аналіт. доп. – Київ : НІСД, 2020. – С. 143–144.

4. Альтернативна енергетика [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://ukraineinvest.gov.ua/industries/energy/alternative-energy/ (дата звернення: 10.04.2026).

5. Скільки енергії виробляє сонячна батарея [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.atmosfera.ua/media/skilki-energiyi-viroblyaye-sonyachna-batareya (дата звернення: 10.04.2026).

6. Zaporozhets A., Babak V., Kulyk M., Denysov V. Step-by-Step Management of the Forecasted Schedule for Aggregated Solar Power Generation in Ukraine [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.preprints.org/manuscript/202603.2081 (дата звернення: 10.04.2026).

УДК 620.9:697.1:005.584.1

Gerasymov A.[1], Rieznychenko V.[1], Skryabina Ya.[2], Liush Yu.[3]
[1] Students, group Ez-515m, NU “Zaporizhzhia Polytechnic”
[2] Student, group Ez-115m, NU “Zaporizhzhia Polytechnic”
[3] PhD (Tech.), assistant professor NU “Zaporizhzhia Polytechnic”

INFLUENCE OF OCCUPANT BEHAVIORAL FACTORS ON BUILDING ENERGY CONSUMPTION

In the context of rising energy costs, increasing requirements for energy efficiency, and the need to reduce greenhouse gas emissions, the issue of rational energy use in buildings is becoming particularly relevant. The building sector is one of the largest energy consumers, which necessitates the search for effective ways to reduce energy consumption. Traditionally, the main focus has been on technical measures such as improving the thermal insulation of building envelopes, modernization of engineering systems, and integration of renewable energy sources. However, along with this, a significant but often underestimated potential for energy saving is associated with the behavior of building occupants [5].

Behavioral factors encompass a set of actions, habits, and decisions of occupants that directly affect the operation of heating, ventilation, air conditioning, lighting, and electricity consumption systems [1, 2]. Unlike technical measures that require significant capital investments, changes in occupant behavior can be implemented with minimal costs while providing a substantial energy-saving effect [4].

The main behavioral factors include the setting of indoor temperature conditions, the nature and duration of ventilation, the intensity of artificial lighting use, as well as the operating modes of household electrical appliances [1, 2]. In particular, an increase or decrease in indoor air temperature by only 1 °C can change heating energy consumption by approximately 5–10%, which is explained by changes in heat losses through building envelopes and ventilation [2]. Thus, even minor adjustments in temperature settings can have a noticeable impact on the overall energy balance of a building.

An important factor is also the ventilation regime. Inefficient practices, such as keeping windows open for long periods during the heating season, lead to significant heat losses and can increase thermal energy consumption by 30–40% [1]. In contrast, short-term intensive ventilation allows for the required air exchange with minimal heat losses. Similarly, irrational use of lighting systems, including leaving lights on in unoccupied rooms or using inefficient light sources, leads to an increase in electricity consumption by 10–20% [5].

An additional aspect is the use of household electrical appliances. Their operating modes, duration of use, and energy efficiency directly affect total electricity consumption [4]. For example, switching appliances to standby mode or completely turning them off can reduce non-productive electricity consumption, which collectively constitutes a noticeable share of total energy use.

To quantitatively assess the impact of behavioral factors, it is advisable to use a scenario-based approach, which involves the formation and comparison of different building operation models [3]. The baseline scenario reflects typical or inefficient occupant behavior, whereas the energy-efficient scenario represents optimized patterns of energy use. The results of such comparative analysis indicate that the potential reduction in energy consumption due to behavioral changes can reach 15–30% without additional capital investments in building modernization [1, 4].

An important direction for improving efficiency is the integration of behavioral factors into building energy management systems [3]. Modern intelligent systems make it possible to account for occupant habits, automatically regulate indoor climate parameters, and optimize the operation modes of engineering equipment. The use of occupancy sensors, programmable thermostats, and adaptive control algorithms creates conditions for combining technical and behavioral approaches to energy saving.

Thus, behavioral factors represent a significant reserve for improving building energy efficiency [1, 2]. Their consideration makes it possible to achieve a substantial reduction in energy consumption without significant financial investments, which is especially important under conditions of limited resources. Further research should be aimed at developing occupant behavior models, integrating them into energy management systems, and evaluating the effectiveness of such solutions under real operating conditions of buildings [3].

REFFERENCES

1. Xu X. A critical review of occupant energy consumption behavior in buildings // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2023. Vol. 176. Article 113238. DOI: 10.1016/j.rser.2023.113238

2. Chen S., Wang Z., Yan D. The impacts of occupant behavior on building energy consumption: A review // Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2021. Vol. 45. Article 101246. DOI: 10.1016/j.seta.2021.101246

3. Hu S., Yan D., Guo S., Cui Y., Dong B. A systematic review of occupant behavior in building energy policy // Energy and Buildings. 2020. Vol. 209. Article 110114. DOI: 10.1016/j.enbuild.2020.110114

4. Ebuy H. T., Fufa S. M., Wiik M. K. Occupant behavior impact on building sustainability and energy performance // Sustainability. 2023. Vol. 15, Issue 3. Article 2440. DOI: 10.3390/su15032440

5. Hafez F. S., Negm A. M., Bady M. F., Yehia A. A. Energy efficiency in sustainable buildings: A systematic review // Sustainable Cities and Society. 2023. Vol. 89. Article 104182. DOI: 10.1016/j.scs.2022.104182

УДК 620.9:640.4:005.584

Козак А.Є.[1], Ліуш Ю.Б.[2]
[1] студ. гр. Е-115 НУ «Запорізька політехніка»
[2] доц. НУ «Запорізька політехніка»

ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ В ПОБУТІ ТА СВІТОВИЙ ДОСВІД ЇХ ВПРОВАДЖЕННЯ

У сучасних умовах питання енергозбереження набуває особливої актуальності у зв’язку із зростанням вартості енергетичних ресурсів, обмеженістю традиційних джерел енергії та необхідністю зменшення негативного впливу на навколишнє середовище. Побутовий сектор є одним із значних споживачів енергоресурсів, тому підвищення ефективності їх використання на цьому рівні має суттєвий вплив на загальний енергетичний баланс країни [1]. Крім економічної складової, енергозбереження сприяє зміцненню енергетичної безпеки та незалежності держави, що є особливо важливим для України.

Енергозбереження в побуті слід розглядати як сукупність організаційних, технічних і поведінкових заходів, спрямованих на раціональне використання енергії без зниження рівня комфорту споживачів.

Одним із ключових принципів є формування свідомого ставлення до споживання енергії. Раціональна поведінка користувачів, зокрема вимикання освітлення та електроприладів у разі їх невикористання, дозволяє досягти зниження енергоспоживання без додаткових фінансових витрат, що підтверджується результатами поведінкових досліджень у сфері енергоспоживання [3].

Важливим напрямом є зменшення тепловтрат будівель. Втрати теплової енергії через огороджувальні конструкції можуть становити значну частку загального споживання. Застосування заходів термомодернізації, зокрема утеплення стін, покрівель, підвальних приміщень, а також встановлення ене-

ргоефективних вікон і дверей, забезпечує істотне підвищення енергетичної ефективності будівель [2].

Суттєву роль відіграє впровадження енергоефективного обладнання. Побутова техніка високих класів енергоефективності (А, А+, А++) характеризується зниженим рівнем споживання електроенергії. Аналогічно, використання світлодіодних джерел світла (LED) дозволяє значно скоротити витрати електроенергії та підвищити довговічність освітлювальних систем [1].

Перспективним напрямом є автоматизація процесів енергоспоживання. Застосування систем керування, зокрема датчиків руху, програмованих термостатів та технологій «розумного будинку», дозволяє оптимізувати режими роботи обладнання та мінімізувати надлишкове споживання енергії.

Світовий досвід у сфері енергозбереження в побуті базується на поєднанні регуляторних, економічних та інформаційних інструментів. Зокрема, у країнах Європейського Союзу впроваджено систему енергетичної сертифікації будівель та встановлено мінімальні вимоги до їх енергоефективності, що стимулює проведення термомодернізації [2]. Значну роль відіграють державні програми фінансової підтримки, зокрема надання грантів та пільгового кредитування для підвищення енергоефективності житлового фонду.

У США та країнах ЄС активно застосовуються поведінкові механізми впливу на споживачів, зокрема інформування про рівень енергоспоживання у порівнянні з іншими домогосподарствами. Дослідження показують, що використання соціальних норм може забезпечити відчутне скорочення енергоспоживання [4]. Також важливим інструментом є впровадження стандартів енергоефективності для побутової техніки.

Окремим напрямом є інтеграція відновлюваних джерел енергії у побутовий сектор, зокрема використання сонячних фотоелектричних систем і теплових насосів, що дозволяє зменшити залежність від традиційних енергоресурсів та підвищити енергетичну автономність домогосподарств [1].

Таким чином, енергозбереження в побутовому секторі є важливим напрямом підвищення енергоефективності, що забезпечує одночасне досягнення економічних і екологічних ефектів. Основними принципами є раціональне використання енергоресурсів, зменшення теплових втрат та впровадження сучасних енергоефективних технологій. Аналіз світового та вітчизняного досвіду підтверджує, що найбільш результативними є комплексні підходи, які поєднують технічні рішення, державне регулювання та підвищення рівня енергетичної культури населення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. International Energy Agency. Energy Efficiency 2023. [Electronic resource]. – URL: https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2023

2. European Commission. Energy efficiency in buildings. [Electronic resource]. – URL: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings_en

3. Abrahamse W., Steg L., Vlek C., Rothengatter T. A review of intervention studies aimed at household energy conservation. Journal of Environmental Psychology. 2005. Vol. 25, No. 3. P. 273–291.

4. Allcott H. Social norms and energy conservation. Journal of Public Economics. 2011. Vol. 95, No. 9–10. P. 1082–1095.

УДК 621.311.21:502.17(477)

Міщенко В.Ю.[1], Брабець О.С.[2], Ciра В.А.[2]
[1] старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. Е-115м НУ «Запорізька політехніка»

БАР'ЄРИ НА ШЛЯХУ РОЗВИТКУ МАЛИХ ГЕС В УКРАЇНІ

Загальний гідроенергетичний потенціал України складає понад 44 млрд кВт·год. (в тому числі малих ГЕС приблизно 3,0 млрд кВт·год.). На сьогодні економічно ефективний потенціал становить близько 17,5 млрд кВт·год., з них вже використовується близько 11 млрд кВт·год. (більше 60 %) 5 . Таким чином, невикористаний ефективний потенціал становить близько 6,5 млрд. кВт·год.

Найбільший технічний потенціал гідроенергетичних ресурсів малих річок зосереджений в Карпатському регіоні (76%). Другою є Правобережна-Дніпровська гідрологічна зона (13%). На лівобережній частині країни потенціал становить 7%.

Можна відокремити такі основні категорії бар'єрів на шляху розвитку малих ГЕС в Україні:

Однією з головних проблем є недостатня інвестиційна привабливість малих ГЕС. Будівництво навіть невеликої гідроелектростанції потребує значних капіталовкладень, а термін окупності часто є досить тривалим.

Серед основних економічних бар'єрів:

- високі початкові витрати на будівництво та модернізацію;
- обмежений доступ до фінансування;
- нестабільність державної підтримки (зокрема механізму «зеленого тарифу»);
- ризики, пов'язані з воєнними діями та пошкодженням інфраструктури.

Крім того, енергетичний сектор України зазнав значних руйнувань, що ускладнює інвестування в нові проєкти

Потенційно, побудова об'єктів гідроенергетики змінює ландшафт та умови землекористування, екологічні ланцюги у відповідних річках, температуру та якість води, впливає на біорізноманіття, може приводити до збільшення викидів парникових газів в результаті інтенсифікації процесів розкладу органічних сполук, замулення верхнього б'єфу річки.

Кадровий потенціал гідроенергетики знаходиться у критичному стані, але є важливою частиною забезпечення умов сталого розвитку галузі: руйнуються профільні лабораторії та інститути; відбувається втрата знань через старіння та відтік спеціалістів із галузі та профільних вищих навчальних закладів (ВНЗ). Все це вже впливає на якість проектування та забезпеченість кваліфікованим персоналом. Ситуація може бути скорегована створенням сприятливих умов праці у галузі та у профільних ВНЗ, підвищенням вимог щодо кваліфікації працівників проектувальних організацій шляхом вдосконалення галузевих стандартів (наприклад, ліцензування).

Крім того, побудова об'єктів гідроенергетики призводить до необхідності відчуження значних територій, які можуть мати історичну чи економічну цінність для місцевої громади, що викликає відповідні наслідки негативного сприйняття громадою. Також будівництво гідроелектростанцій змінює екологію регіону, особливо за наявності водосховищ, що може впливати на стан здоров'я певних груп населення. Можуть виникати конфлікти з певними групами населення щодо водокористування. Часто населення цікавить можливість доступу до риболовства на водосховищах. В Україні вже наявний негативний досвід конфліктування з населенням регіону, де планується будівництво гідроелектростанцій.

До технічних обмежень належать: зношеність існуючих гідротехнічних споруд, недостатній розвиток енергетичної інфраструктури, складність інтеграції нових джерел енергії в енергосистему, необхідність модернізації старих ГЕС.

Також важливо враховувати, що для ефективного функціонування малих ГЕС необхідно правильно визначати їх потужність і місце підключення до мережі

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Гідроенергетичний потенціал України та перспективи розвитку малих ГЕС // Відновлювана енергетика. 2023. № 2. С. 15–22.

2. Енергетична стратегія України до 2050 року [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://mev.gov.ua (дата звернення: 10.04.2026).

СЕКЦІЯ «ЕЛЕКТРОПРИВОД ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОМИСЛОВИХ УСТАНОВОК»

УДК 621.3
Поляков М.О.
[1] проф. НУ «Запорізька політехніка»

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ДІАГНОСТУВАННЯ ЕЛЕКТРОННИХ МОДУЛІВ

Контроль технічного стану та локалізація дефектів в електронних модулях є важливим завданням на всіх етапах життєвого циклу елементів систем автоматизації. Електронні модулі за конструкцією є друкованими платами на яких змонтовані різноманітні електронні компоненти – від резисторів до мікроконтролерів.

Боротьба за зменшення габаритів модулів привела до того, що переважна більшість контактів елементів недоступні для під'єднання до контрольно-діагностичної апаратури. Функціональна складність, обмежений доступ до контактів, поєднання у одному модулі як цифрових так і аналогових вузлів істотно ускладнює завдання контролю та діагностики електронних модулів і робить актуальними дослідження у цій галузі.

Дослідження вимагають створення моделей технологічного процесу, операції технічного обслуговування модулів у процесі їх контролю та діагностики а також моделей дефектів. Потрібні також методи контролю правильності функціонування та параметрів модулів, локалізації місця дефектів, функціонально-вартісного аналізу ефективності застосування контрольно діагностичного обладнання, методи забезпечення контролепридатністі модулів на етапі проєктування, методи розробки контролюючих та діагностуючих тестів.

У фокусі дослідження методи контроля правильності електричних з'єднань друкованої плати та плати з встановленими електронними компонентами за допомогою «ліжка з цвяхів», методи контролю функціонування через зовнішній роз'єм та за допомогою «літаючих» зондів.

Окремого дослідження потребує питання застосування методу JTAG для експлуатаційної діагностики мікроконтролерних плат у складі систем користувача, наприклад БПЛА, автономних транспортних засобів, розумних будинків, автоматичних ліній тощо.

Ці питання розглядались під час викладання курсу «Технічна діагностика електронних модулів» для студентів кафедри «Електропривод та автоматизація промислових установок» в НУ «Запорізька політехніка». Подальші дослідження планується проводити в рамках держбюджетної НДР.

УДК.621.354.82
Зіновкін В.В.[1], Крисан Ю.О.[2], Пирожок А.В.[2], Масловець І.В.[3]
[1] д-р.техн.наук, проф. НУ «Запорізька політехніка»
[2] доц. НУ «Запорізька політехніка»
[3] асп. НУ «Запорізька політехніка»

МЕТОДИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТАТИЧНОЇ СТІЙКОСТІ ВИСОКОЧАСТОТНОГО СИНХРОННОГО ДВИГУНА ПРИ ЖИВЛЕНІ ІНДУКЦІЙНОЇ ПЕЧІ

В процессі роботи індукційних печей, в наслідок впливу низки небажаних факторів, в синхроному двигуні формуются не стаціонарні електромагнітні процеси. Має місце накопичення кумулятивних ефектів різної фізичної природи. і як наслідок, аварійні виходи із ладу спеціалізованого електроприводу в цілому та суттєвого зростання техніко-економічних збитків.

Актуальність роботи полягає в забезпеченні роботи високочастотного двигуна в номінальних режимах в межах нормованих перевантажень, стабілізації технологічного режиму індукційної печі та запобігання аварійних ситуацій в електротехнологічному комплексі.

Мета дослідження полягає у науково-технічному пошуку впливу несприятливих факторів і режимів комутуючих та компенсуючи пристроїв в мережі живлення електротехнологічного комплексу на високочастотний генератор.

Наукова новизна полягає у розробці теоретичних і технічних методів забезпечення статичної стійкості високочастотного синхронного двигуна як визначального технічного елемента живлення індукційної печі.

Об'єктом дослідження є несприятливі електротехнологічні режими та фактори та їх вплив на статичну стійкість синхронного двигуна.

Для запобігання несприятливих умов роботи синхронного єлектроприводу доцільно використовувати наступні технічні заходи:

-Установку реакторів у мережі для регулювання потоків реактивної потужності в режимі мінімальних навантажень та обмеження напруги до величини, що не перевищує номінальної, тобто: $1{,}05U_{\text{ф}}$.;

- Обмеження напруги в режимі синхронізації до $1{,}15\cdot U_{\text{ф}}$;

- Обмеження перенапруги безпечної для ізоляції, що упереджує аварійні виходи із ладу.

При додержані приведенних умов скористаємось наступною формулою:

$$\dot{U}(0) = A\dot{U}(\ell) + B\dot{I}(\ell)\,. \qquad (1)$$

Приймемо, що напруга на шинах системи живлення збігається з віссю дійсних величин $\dot{U}(l) = U(l)$, а напруга на шинах компенсаторів випереджає напругу на кут θ, тобто:

$$\dot{I}(\ell) = \frac{\dot{U}(0) - A \cdot U(\ell)}{B} = jU(0)\frac{\sin\theta}{B} + \frac{U(0)\cos\theta - A \cdot U(0)}{B}. \qquad (2)$$

У випадку відсутності або відключення реакторів ($A=\cos\beta\ell$; $B=jz_c \sin\beta\ell$) якість струму можливо визначити в залежності від дійсних напруг на ланцюгах та зміни опору в мережі живлення індукційної печі по наступній формулі:

$$\dot{I}(\ell) = \frac{U(0)}{z_c}\frac{\sin\theta}{\sin\beta\ell} - j\frac{U(0)\cos\theta - U(\ell)\cdot\cos\beta\ell}{z_c \sin\beta\ell} = I_a - jI_p. \qquad (3)$$

При $U(0) = U(\ell) = U_\phi$ активна та реактивна складові напруги, що виражені у відносних одиницях т. е. в долях $P_{нат}$, активний і реактивний струм визначається наступною системою рівнянь:

$$I_a = \frac{U_\phi}{z_c}\frac{\sin\theta}{\sin\beta\ell}; \quad I_p = \frac{U_\phi}{z_c}\frac{\cos\theta - \cos\beta\ell}{\sin\beta\ell} \qquad (4)$$

Якщо

$$\theta = \beta\ell, \text{ то } I_a = U_\phi / z_c \text{ і } I_p = 0$$

– активна потужність, що передається, дорівнює натуральній, а реактивна потужність дорівнює нулю. Це означає, що по всій довжині мережі вектори напруги і струму збігаються по фазі, тобто при переході від однієї точки мережі до іншої повертаються на один і той же кут $\boldsymbol{d\theta = \beta d\ell}$. Модулі струмів та напруги не змінюються вздовж мережі.

При передачі потужності менше номінальної $\theta < \beta\ell$, тобто кут між векторами напруги по кінцях ланцюга зменшується в порівнянні з її хвильовою довжиною і в кожній точці цього ланцюга з'являється зсув по фазі між векторами напруги і струму. Це призводить до перетікання реактивної потужності, як це випливає з (4) і, як наслідок, часткового порушення статичної стійкості синхронної машини.

Протікання ємнісного струму рівнозначне протіканню індуктивного струму і, технічно, може бути примусово використаний для дотримання номінальних параметрів напруги і електротехнологічного комплексу.

Наявність ємнісної складової струму призводить до зміни напруги, максимальне значення якої можливо оцінити за наступним виразом:

$$U_{\text{макс}} = U\left(\frac{\ell}{2}\right) = U_{\text{ф}} \frac{\cos\frac{\theta}{2}}{\cos\frac{\beta\ell}{2}} \qquad (5)$$

Таким чином видно, що навіть при невеликому зменшенні потужності в мережі живлення печі в порівнянні з номінальними параметрами навантаження має місце зростання напруги вище номінальної, що також впливає на статичну стійкість високочастотної машини. Це свідчить про технічну необхідність усунути це явище шляхом компенсації ємнісним струмом, що можливо досягти шляхом використання реакторів. Технічні умови досягнення означеного пояснюється тим, що підставляючи в (2) відповідні параметри перевищення номінальних параметрів навантаження в межах qc =0; $q'p1+ q''p1 = qp1$; $qp2$ =0 и $\ell1=\ell2=\ell/2$, отримуємо наступні визначальні умови:

$$\dot{I}(\ell) = \frac{U_{\text{ф}}}{z_c} \frac{\sin\theta}{\sin\beta\ell + q_{p1}\cdot\sin^2\frac{\beta\ell}{2}} - j\,\frac{U_{\text{ф}}}{z_c} \frac{\cos\theta - \left(\cos\beta\ell - \frac{q_{p1}}{2}\sin\beta\ell\right)}{\sin\beta\ell + q_{p1}\cdot\sin^2\frac{\beta\ell}{2}}. \qquad (6)$$

Звідки видно, що при одній і тій же активній потужності, що передається струмом (I_a), кут між векторами напруги призводить до зменшення запасу стійкості синхронної машини, а складова струму зменшується, що призводить до зменшення перепаду напруги. Модуль цієї напруги між електроприводом і індукційною піччю можливо оцінити по наступному виразу:

$$U\left(\frac{\ell}{2}\right) = U_{\text{ф}} \frac{\cos\frac{\theta}{2}}{\cos\frac{\beta\ell}{2} + \frac{q_{p1}}{2}\cdot\sin\frac{\beta\ell}{2}} \qquad (7)$$

Розподіл струму та напруги вздовж мережі витікає із аналізу (7) і (6), що дає можливість визначити оптимальні параметри компенсатора реактивної потужності та вплив комутуючих перенапруг. Також можливо оцінити оптимальні параметри всього електротехнічного устаткування в поєднанні із електротехнічним комплексом при різних значеннях потужності, що споживається піччю, тобто, щоб напруга на реакторі не перевищувала заданої величини, наприклад, $\boldsymbol{U_{\phi}}$:

$$q_{p1} = 2\,\frac{\cos\frac{\theta}{2} - \cos\frac{\beta\ell}{2}}{\sin\frac{\beta\ell}{2}}. \qquad (8)$$

А у граничному випадку P=0, тобто θ=0,

$$q_{p1} = 2\frac{1 - \cos\frac{\beta\ell}{2}}{\sin\frac{\beta\ell}{2}} = 2 \cdot \tan\frac{\beta\ell}{2} \ . \qquad (9)$$

Таким чином показано, що для забезпечення статичної стійкості синхронного генератора необхідно дуже ретельно враховувати поточні параметри і забезпечити умови дотримання, або не значного перевищення параметрів навантаження від номінальних.

УДК 621.313:517.9:519.8
Зіновкін В.В.[1], Крисан Ю.О[2], Антонов М.Л[2]., Пирожок А.В[2]., Казурова А.Е[2].
[1] проф. НУ «Запорізька політехніка»
[2] доц НУ «Запорізька політехніка»

ВИРІШЕННЯ ІНТЕГРО-ДИФЕРЕНЦІЙНИХ РІВНЯНЬ СКЛАДНИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ МЕТОДОМ ГРАНИЧНОЇ КОЛОКАЦІЇ

Електромеханічні системи найбільш розповсюджений вид електротехнічного устаткування в промисловості і побуті світової спільноти. Від ефективності їх функціонування суттєво залежать техніко-економічні показники енергоємних комплексів та якість продукції, що виробляється.

Особливої актуальності набувають питання щодо розробки та підвищення надійності таких спеціалізованих пристроїв наземного, повітряного та іншого не дуже розповсюдженого призначення. На стадіях розробки складних електромеханічних систем виконується пошук найбільш оптимального варіанту конструкції в цілому в поєднанні із сучасними мікропроцесорними і програмними засобами автоматизації.

Проектування здійснюється на підставі відповідних технічного завдання та технічних вимог, яким повинна задовольняти електромеханічна система в процесі функціонування. Для досягнення таких вимог, на стадії перед проектної розробки, виконуються доволі складні наукові дослідження електромагнітних та електромеханічних процесів з використанням відповідних математичних та комп'ютерних моделей. В основу математичних моделей покладено інтегро-диференційні рівняння, в яких аналітично поєднано множину параметрів різної фізичної природи. Конструкція складної електромеханічної системи вибирається таким чином, щоб при номінальних (зовнішніх) параметрах навантаження (внутрішні) електромагнітні не перевищували таких, що обмежуються ДСТУ та відповідною нормативно-технічною документацією. До зовнішніх відносяться струм, напруга, потужність, та її складові, частота, якість електричної енергії, межі коливання та відхилення, втрати корот-

кого замикання, вільного ходу та навантаження. До внутрішніх відносяться рівні і розповсюдження електромагнітного поля розсіювання в просторі конструкції, місцеві додаткові втрати, електродинамічні зусилля в системі збудження електромагнітного поля, рівні магнітного потоку в магнітній системі, загальні і місцеві теплові перевантаження активних і неактивних деталей конструкції, загальні рівні шуму та в спектрі октавних частот, діелектричні властивості ізоляції, грозові та імпульсні перенапруги та ін. Таким чином математична модель поєднує між собою множину зовнішніх і внутрішніх параметрів різної фізичної природи. При цьому, велике значення набуває вибір металевих і ізоляційних матеріалів від фізико-хімічних властивостей яких може суттєво залежати якість і надійність об'єкта в цілому в процесі експлуатації. Не останнє місце займають питання впливу різних факторів та збурень. В подальшому два останні питання враховувати не будемо з метою більш змістовного та доказового рішення диференційних рівнянь методом граничної колокації.

Наряду із низкою переваг існуючих методів дослідження електромагнітних процесів їм притаманні наступні недоліки: - вирішення складних задач зводиться до зростання систем лінійних алгебраїчних рівнянь доволі високого порядку; отримані результати залежить від розуміння і сприйняття взаємодії сукупності процесів при розробці моделі; швидкодія не завжди відповідає вимогам інженерних методів; на стадіях вибору оптимального варіанту об'єкта інженерні розрахунки можуть призвести до хибних та спотворених результатів; врахувати впливу елементів конструкції практично не можливо.

Запропонований методологічний підхід до вирішення поставленої мети має низку практичних переваг внаслідок використання інтегрально-диференційного метода в поєднанні із методом граничної колокації. Методологічна сутність полягає в наступному. Математична модель складається із декількох задач (секторів) електромагнітного, високовольтного, теплового, електродинамічного рівня.

Об'єкт дослідження розбиваєтеся на n секторів Ω_k в тривимірному просторі В кожному із цих секторів виконуються наступні інтегральні умови:

$$\int_u \int_{\Omega_k} [U_m - f(x,y,z)]\, d\Omega_k = 0. \qquad (1)$$

де U_m – апроксимуюча функція; f (x, y, z) - граничні умови в межах Ω_k.

Вважаємо, що в апроксимуючій функції використовується m членів. В подальшому переходимо до двовимірної задачі і на кожному задовольняються умови

$$\int_a^b \{U_m(x,y) - f(x,y)\}\, dS = 0 \qquad (2)$$

де y = y (x) – рівняння процесу в даних межах ділянки; *a* и *b* - абсциси початку і кінця площини; $dS = \sqrt{1 + [y'(x)]^2}$.

Виконання умов (1) та (2) призводить до системи лінійних алгебраїчних рівнянь відносно коефіцієнтів апроксимуючого ряду. В подальшому рішення виконується як і в методі граничної колокації.

Доцільно уважно аналізувати отриманий результат для подальшого його використання.

1. При рівній кількості рівнянь такий підхід призводить до більш точних результатів в порівнянні із методом граничної колокації, оскільки в кожних межах (в силу (1) або (2)) хоча б в одній точці граничні умови виконуються обов'язково.

2. Дуже часто інтегральний метод дозволяє отримати більш точний результат при меншій кількості рівнянь, хоча їх складання складніше, в порівнянні з методом граничної колокації.

3. При використанні інтегрального методу відхилення від граничних умов на кожній межі границі повинно бути рівномірним.

4. В окремих випадках більш раціонально скористатись шляхом комбінацій різних методів – використанням змішаного методу. При цьому граничні умови задовольняються точно в заданих характерних точках. Останнє розповсюджується на межі, що описуються складною функцією і інтегрально скоректовані по контурам. Такі сполучення дають можливість, зберігаючи переваги методу граничної колокації, позбавитись в значній мірі від його недоліків.

5. У випадку, коли рівняння, що описує границі області процесу (або його окремих меж) y=f(x) доволі складне, то використання інтегрального методу суттєво ускладняється внаслідок використання шляхів вирішення інтегралів і складання математичної моделі стає доволі не прийнятним та трудомістким. Тут доцільно скористатись методом середніх.

6. Систему N лінійних рівнянь із S невідомими отримана методом граничної колокации можливо представити в наступному вигляді:

$$\left.\begin{aligned} a_1A_1 + a_2B_1 + \ldots a_SF_1 &= n_1 \\ a_1A_2 + a_2B_2 + \ldots a_SF_2 &= n_2 \\ a_1A_N + a_2B_N + \ldots a_SF_N &= n_N \end{aligned}\right\} \quad (3)$$

де N – кількість рівнянь з S невідомими A_1, A_2 ... A_N; B_1, B_2... B_N; F_1, F_2 ... F_N - коефіцієнти при невідомих; a_1, a_2, … a_S – невідомі; n_1, n_2 … n_N - праві частини в системі рівнянь.

Із системи (3) із N рівнянь, отримуємо систему, що складається із S відповідних рівнянь. Для цього необхідно об'єднати рівняння у відповідні групи, при цьому і-а група складається із k_i рівнянь. Очевидно, що $\sum_{i=1}^{s} k_i = N$ а число груп дорівнює S.

Складаючи всі рівняння в кожній групі отримуємо наступну систему із S відповідних рівнянь:

$$\left.\begin{aligned} a_1\alpha_1 + a_2\beta_1 + \ldots a_S\varphi_1 &= \acute{n}_1 \\ a_1\alpha_2 + a_2\beta_2 + \ldots a_S\varphi_2 &= \acute{n}_2 \\ a_1\alpha_S + a_2\beta_S + \ldots a_S\varphi_S &= \acute{n}_S \end{aligned}\right\} \qquad (4)$$

Вирішивши цю систему, знаходимо коефіцієнти, що потрібні. Максимальна похибка при вирішені системи методом середніх дорівнює:

$$\epsilon = \sqrt{\frac{[VV]}{N-S}} \qquad (5)$$

Прийняті позначення означають: $[VV]=V_1^2 + V_2^2 + \ldots + V_N^2$; $V_i=A_iQ_1+B_iQ_2 \ldots +F_i Q_S$; n_i – нев'язка і-го рівняння.

Похибка при визначенні кожного невідомого визначається за наступним рівнянням:

$$\epsilon_i = \frac{\epsilon}{D}\sqrt{k_1M_1^2 + k_2M_2^2 + \ldots + k_SM_S^2} \qquad (6)$$

де

$$D = \begin{vmatrix} a_1\beta_1\Upsilon_1\ldots\varphi_1 \\ a_2\beta_2\Upsilon_2\ldots\varphi_2 \\ a_S\beta_S\Upsilon_S\ldots\varphi_S \end{vmatrix} \qquad (7)$$

– визначальник системи (4); M_i — мінор елемента Q_i.

Таким чином показано:

1.На стадії перед проектної проробки оптимальної конструкції складної електромеханічної системи доволі ефективно скористатись методом граничної колокації, що призводить до похибки отриманих результатів, що знаходиться в межах 10-12%.

2. Для отримання більш точних результатів дослідження і оптимізації складних електромеханічних систем необхідно скористатись методом вирішення інтегро-диференційних рівнянь в межах граничних і початкових умов (крайових задач), що узгоджуються з технічним завданням і технічними умовами.

3.Складання математичної моделі електромагнітних та електромеханічних процесів в електромеханічній системі потребує доволі кропіткої роботи при використанні більш ефективного методу дослідження.

УДК 621.3
Пирожок А.В[1], Павлюк Р.О.[2]
[1] доц. НУ «Запорізька політехніка»
[2] директор центру «Авіоніки» НУ «Запорізька політехніка»

ПЕРСПЕКТИВИ ТА ВИКЛИКИ ВИКОРИСТАННЯ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ У ПОЖЕЖОГАСІННІ: ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ОГЛЯД ТА СПЕЦИФІКА ЗАСТОСУВАННЯ В УМОВАХ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ

Сучасна парадигма пожежогасіння в умовах високощільної міської забудови та масштабних екологічних криз потребує радикального оновлення інструментарію оперативного реагування. Традиційні методи ліквідації пожеж у висотних будівлях та важкодоступних лісових масивах часто виявляються малоефективними через технічні обмеження наземної техніки та високі ризики для особового складу. Безпілотні літальні апарати (БПЛА) сьогодні розглядаються не лише як засіб допоміжного спостереження, а як повноцінний компонент автоматизованих систем пожежогасіння, здатний забезпечити безпрецедентну швидкість розгортання та точність ударного впливу на осередок горіння [1].

Аналіз актуальних технологічних рішень

Поточний етап розвитку галузі характеризується переходом від багатофункціональних платформ моніторингу до вузькоспеціалізованих ударних систем. Сучасні розвідувальні комплекси, представлені лінійками типу DJI Matrice 350 RTK, забезпечують мультиспектральний аналіз зони надзвичайної ситуації, дозволяючи ідентифікувати термічні аномалії крізь щільні завіси диму за допомогою інфрачервоних сенсорів. Це створює інформаційний фундамент для прийняття стратегічних рішень у реальному часі.

Паралельно з моніторингом розвивається сегмент важких БПЛА, призначених для активного придушення вогню. Платформи на кшталт EHang EH 216F або Spider IH300 інтегрують у себе модулі порошкового гасіння та капсульні пускові установки. Особливістю таких систем є здатність здійснювати прицільне ураження осередків на висотах, що перевищують робочий діапазон стандартних автодрабин. Використання керованих снарядів для руйнації скляних фасадів дозволяє дронам доставляти інгібітори горіння безпосередньо всередину закритих приміщень, мінімізуючи супутню шкоду від проливу води [2].

Окремим перспективним напрямком є впровадження концепції ройового інтелекту (swarm intelligence), де група автономних апаратів Fire Swarm координує свої дії для створення ефекту безперервного впливу на фронт пожежі. Така архітектура дозволяє масштабувати зусилля залежно від інтенсивності горіння, що є особливо актуальним для ліквідації масштабних лісових пожеж у зонах із відсутньою інфраструктурою [3].

Технологічні бар'єри та вектори їх подолання

Попри значний прогрес, масова імплементація пожежних БПЛА стикається з низкою критичних викликів. Першочерговою проблемою залишається низька енергоефективність існуючих джерел живлення, що обмежує оперативний радіус та час активної роботи під навантаженням. Вирішення цього питання вбачається у переході на водневі паливні елементи або гібридні силові установки, що здатні забезпечити тривале патрулювання.

Не менш важливим є аспект стійкості конструкційних матеріалів до екстремальних термічних впливів. Розробка авіаційних планерів із використанням вогнетривких композитів та керамічних покриттів є необхідною умовою для безпечного наближення апарата до епіцентру горіння. До того ж, умови роботи в зонах НС, особливо на прифронтових територіях, потребують впровадження високонадійних каналів зв'язку, захищених від радіоелектронних завад, та систем автономної навігації (SLAM), здатних функціонувати в умовах відсутності сигналу GPS [4].

Висновки та перспективи досліджень

Перспективи розвитку пожежних БПЛА нерозривно пов'язані з поглибленням автономності систем керування. Майбутні дослідження мають бути зосереджені на створенні самонавчальних алгоритмів штучного інтелекту, здатних прогнозувати динаміку поширення вогню та оптимізувати витрати вогнегасних речовин без прямої участі оператора. Інтеграція таких БПЛА у загальнодержавні системи цивільного захисту дозволить суттєво знизити час реагування та мінімізувати втрати серед рятувальників та цивільного населення [5].

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Державна служба України з надзвичайних ситуацій. Офіційний звіт про впровадження новітніх технологій у сфері цивільного захисту (2025). URL: https://dsns.gov.ua/ (дата звернення: 08.05.2026).

2. EHang Holdings Ltd. Technical Specifications of EH 216F: Autonomous Aerial Firefighting Solution. Technical Report, 2024.

3. John J., Sundaram S. Cooperative Search and Localization of Wildfires using Multi-UAV Swarms. Journal of Intelligent & Robotic Systems. 2025. Vol. 112, № 3. P. 45–62.

4. Ivanov O., Pavliuk R. Strategic Use of UAVs for Firefighting in Conflict Zones. Scientific Bulletin of Zaporizhzhia National Polytechnic University. 2025. № 14. P. 88–95.

5. Wang L., Miller R. High-Payload UAV Systems for High-Rise Building Firefighting: Fluid Dynamics and Control. MDPI Drones. 2025. Vol. 9, № 1. Art. 12.

УДК 621.31

Козлов В.В.[1], Набокова О.В.[1]
[1] доц. НУ «Запорізька політехніка»

ЯК ВИКОНУЮТЬ ЗАЗЕМЛЕННЯ В РІЗНИХ КРАЇНАХ

Електрика з розетки 220 В може бути причиною серйозних електроопіків і електротравм - у тому числі із сумним результатом. У дев'яти випадках - нічого, на десятий - травма з наслідками (від глибоких опіків, до зупинки серця, подиху й інших збоїв «автоматики» організму). Особливо це небезпечно для людей похилого віку й маленьких дітей. До речі, напруга в 110 В теж може бути смертельним (умовно-безпечним для здоровішої людини у вологому приміщенні вважається 12 В, із сухому — 36 В, але, фактично граничних значень тут немає).

Багато хто зустрічався з тим, що звичні електроприлади з металевим корпусом завдавали удару струмом. Хтось відчував ледь помітне пощипування, а в когось удар викликав скорочення м'язів, шок і опіки. Це часто трапляється із чайником, холодильником, електроплитою, мікрохвильовкою і іншими приладами зі струмопровідними частинами.

Почнемо з того, що справні прилади не становлять небезпеки навіть при відсутності заземлення. Людина може стати провідником тільки при контакті фазного проводу з корпусом пристрою. При цьому обладнання не подасть ніяких ознак і буде нормально функціонувати. Просте торкання рукою при цьому може привести до необоротних наслідків.

Струм проводять не лише метали. Людське тіло, земля, будівельні матеріали - усе це хоч і погано, але проводить струм. У результаті заземлений далеко на підстанції нуль стає причиною різниці потенціалу між підлогою кімнати й корпусом електроприладу. На підлозі - нуль, на нашому приладі - фаза, а людей своїм торканням замикає це коло.

Результат залежить від опору зазначеного кола. Опір у свою чергу залежить від відстані до підстанції, висоти будинку, матеріалу підлоги, взуття і т.д. У результаті хтось зазнає пощипування, а хтось може серйозно постраждати.

Уникнути цього дозволяє заземлення корпусів приладів.

Цю просту істину люди зрозуміли далеко не відразу. До середини 60-х років багато хто навіть не підозрював про те, що для безпеки в будинку потрібний ще один провід, а не тільки нуль і фаза.

У якості закономірного підсумку тисячі людей загинуло. І тільки після цього, в 1958 році заземлення стали ставити скрізь в обов'язковому порядку. Зрозуміло, що увесь світ намагався якось цей процес уніфікувати, підігнати під свої стандарти, однак дві країни пішли своїм власним шляхом.

Перша країна - це СРСР (та країни які утворились в результаті його розпаду, у тому числі Україна). Згідно з нашими вимогами, заземлення необхідно робити у формі класичного трикутника. Тобто, за допомогою кувалди й мускульної сили, у землю заганяються три довгі товсті сталеві прути. Згідно з електротехнічними нормами, їх потрібно забивати у грунт на глибину від 2 до 3 метрів. А оскільки істина завжди посередині, то електрики забивають штирі на глибину в 2,5 метра. Потім штирі обварюються штрипсом (смугою), до нього прикручується жила й заземлення вводиться в будинок.

У Європі й Азії вважається достатнім забити в землю приблизно на 1-2 метра звичайний мідний пруток товщиною 25-30 міліметрів. За їхніми нормами це цілком достатньо. Як слідство суттєво полегшує фізичний процес.

Крім того мідь набагато кращий провідник, ніж залізо, яке швидко окислюється, іржавіє, крім того постійно відвалюється штрипс або жила.

В нашій країні електрики говорять, що одного штиря мало, але це не так. Це одного залізного штиря мало, до того ж за пару десятків років він іржавіє й розвалюється. Мідь же покривається шаром оксиду й консервується на багато сторіч уперед. Навіть у самому лужному пухкому ґрунті, де є контакт металу з киснем, за 14 років мідний штир згниває на 0,15 мм. Тобто для повного корозійного зносу мідного штиря товщиною 25 міліметрів повинно пройти 2490 років. Так що часовий запас на капремонт шини заземлення є.

Друга країна, яка пішла своїм шляхом - США. У США свої будівельні норми, які підходять винятково для їхнього каркасного (і не тільки) домобудівництва. Звичайно, стосуються вони й заземлення.

До 1952 року ці норми збігалося з європейським. Тобто, до 60-х років американці точно так само, як і європейці біля кожного будинку вбивали мідний штир.

Однак незабаром усе змінилося й тепер у США взагалі нічого в землю не забивають. Немає в них заземлюючого контуру ні за будинком, ні перед будинком, ні з боків.

Замість це вони використовують заземлення Уфера.

"Заземлення Уфера" (the Ufer ground) – метод заземлення, названий на честь Герберта Уфера (Herbert G. Ufer), який працював консультантом армії США під час Другої світової війни.

Метод був придуманий для організації заземлення бомбосховища в пустелі (м. Тусон, шт. Аризона), де не було підземних ґрунтових вод і не було достатнього рівня опадів. Надзвичайно сухий ґрунт зажадав би сотні метрів мідних стрижнів, занурених у землю, щоб створити необхідний опір заземлення.

Тому військові поставили перед інженером Гербертом Уфером завдання знайти більш дешевий і практичний, у порівнянні із традиційним, спосіб заземлення. Він довго ламав голову над тем, як і чим зробити заземлення в сухому піску. Він навіть думав над тем, щоб улаштувати крапельниці над мідними стрижнями, щоб вони змочували пісок.

Зрештою йому спала на думку приголомшлива по простоті й ефективності ідея: він вирішив заземлитися до... фундаменту. Уфер виявив, що бетон має провідність краще, чим більшість типів ґрунту й розробив схему заземлення на основі заземлюючих електродів, укладених у бетон. Він розбив шматок бетонного кута й приварив мідну шину заземлення до арматур, після чого заміряв опір. Його потрясло наскільки воно було мале. Цей метод виявився дуже ефективним і не коштував великих грошей, тому був реалізований на території бомбосховища. Відтоді всі американські бази почали заземлювати через фундаменти.

Бетон швидко вбирає вологу, а втрачає її дуже повільно, через це вдається «тримати» опір заземлення на потрібному низькому рівні. Уфер також помітив, що ґрунт, що оточує бетонний «корпус», мав більш низький опір, чим вдалині від цього об'єкта. Це було пов'язано з тим, що бетон іонізував її.

Відслуживши в армії й пішовши на пенсію, Уфер заснував власну компанію, яка почала просувати нову систему заземлення Ufer Ground для приватного домобудівництва. Завдяки їй він став мільйонером.

Цим методом користуються й донині, організовуючи системи заземлення й блискавкозахисту для приватних будинків, радіо- і телевізійних веж, стовпів освітлення та ін. У якості «начинки» для бетону використовують не тільки мідні стрижні, але також арматуру з нержавіючої сталі, яка менше піддана окисненню від бетонного оточення, ніж мідь.

Довговічність і надійність сталевої арматур у бетоні залежать від:

- сполуки бетону і його рівня кислотності;
- площі контакту бетону із землею (ґрунтом);
- опору ґрунту й наявності ґрунтових вод;
- розміру й довжини арматурних стрижнів.

Недоліком заземлення Уферу є те, що волога в бетоні може стати причиною руйнування такого «фундаменту» у випадках відводу струму блискавки на це заземлення.

Уфер продовжував тестувати свій метод. Результати цих дослідів були видані в доповіді, зробленій на Технічній конференції в 1963 році. Використ-

тання бетону в заземлюючім устрої було включено в список дозволених в американському Національному електротехнічному кодексі National Electrical Code (NEC).

За ці роки термін "Заземлення Уфера" (Ufer ground) став синонімом для заземлення будь-якого типу з використанням бетону, незалежно від того, чи відповідає він оригінальній схемі Герберта Уфера чи ні.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ufer H. G. Investigation and Testing of Footing-Type Grounding Electrodes for Electrical Installations. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. 1964. Vol. 83, № 10. P. 1042–1048. doi: 10.1109/TPAS.1964.4765938.

УДК 621.31
Козлов В.В., Набокова О.В.
доц. НУ «Запорізька політехніка»

ЧОМУ СВІТЛОДІОДНА ЛАМПА СВІТИТЬСЯ ПІСЛЯ ВИМИКАННЯ?

Багато хто зіткався із загадковим явищем: світлодіодні лампи продовжують тускло світитися або мерехтіти після вимикання. Містика тут ні при чому - причина криється у фізику й особливостях сучасної електроніки. Розглянемо основні причини світіння й способи їх усунення (рис. 1).

Причина №1. Дешева лампа.

Найбільш імовірною причиною можна назвати низьку якість компонентів або брак лампи. У дешевих світлодіодних лампах застосовуються спрощені драйвери без захисних елементів, які дуже чутливі до різного роду наведенням.

Для прикладу: у драйвері є конденсатор С1, який, може розряджатися поступово і якийсь час підтримувати світіння світлодіодів (протягом короткого часу, приблизно до 20 с). Вирішується проблема легко, простою заміною лампи на виріб від відомого виробника з гарантією.

Причина №2. Невідповідний для цих цілей вимикач із підсвічуванням.

Раніше у світильниках стояли звичайні лампи розжарювання, а з установкою світлодіодних ламп почалися проблеми. Уся справа в тому, що через електричне коло підсвічування, наприклад, неонову лампу або светлодіод, може протікати невеликий струм, якого може цілком вистачати для зарядки конденсатора в драйвері. При цьому тьмяне світіння або мерехтіння може бути протягом досить тривалого часу.

Для розв'язку проблеми є кілька шляхів:

– підібрати й підключити шунтувальний конденсатор;

– просто відключити коло підсвічування;
– замінити вимикач.

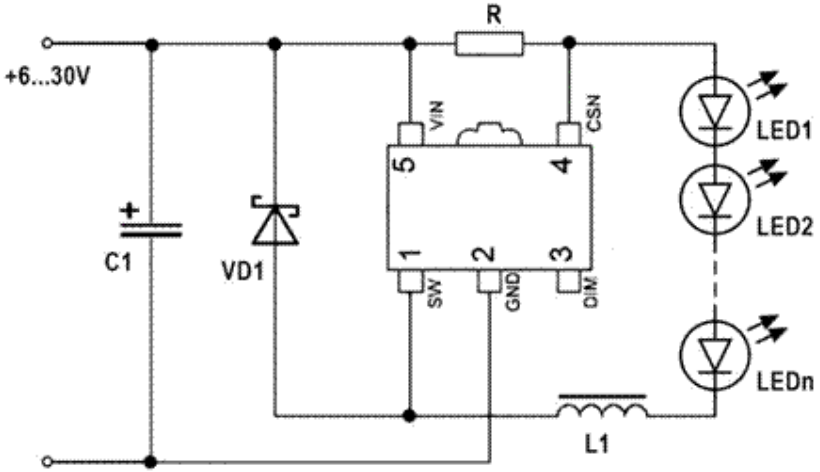


Рисунок 1 – Схема вмикання світлодіодної лампи

Причина №3. Регулятор яскравості.

Також світіння светлодіодов після відключення може відбуватися через несумісний або несправний регулятор яскравості (димер, від англ. dim — затемнювати) або сенсорний вимикач.

Далеко не всі такі пристрої підходять для роботи зі светлодіодними лампами, про що виробники попереджають покупців написами на упаковці.

Причина №4. Неправильне підключення світильника, коли вимикач розриває не фазу, а нуль.

У цьому випадку навіть у виключеному стані на патрон лампи постійно подається фаза. Це створює ризик удару струмом при заміні лампи. Якщо до того ж до цього сама проводка є старою, то через погану ізоляцію можливі витоки й світіння лампи.

Однак навіть при правильному підключенні й цілком справній проводці, напруга на нульовому провіднику може з'являтися через ємнісний струм.

Адже сама проводка є конденсатором. Для цього потрібні будь-які два провідники, розділені ізолятором, і змінний електричний струм, що протікає по фазному проводу. У якості ізолятора може виступати не тільки ізоляція жил, але також повітря й матеріал стіни.

Чому це явище приводить до світіння светлодіодною лампи? У випадку з розривом вимикачем нуля, а не фази, фазний провід на всьому протязі до

лампи буде перебувати під напругою. Виходить, між ним і відключеним нульовим проводом, що йдуть від лампи до вимикача, існує ємнісний зв'язок.

Через розподілену ємність протікає дуже слабкий ємнісний струм, звичайно частки міліампера. Для лампи розжарювання його недостатньо, але електронний драйвер світлодіодної лампи спроектований для роботи з малими струмами. Тому мізерного ємнісного струму цілком може бути досить для часткової зарядки зглажуваючого конденсатора у драйвері, що приведе до тьмяного світіння або періодичного миготіння світлодіодов після вимикання.

Зрозуміло, що вважати аварійної подібну ситуацію не потрібно. Наявність невеликого потенціалу на відключеному проводі через ємнісне наведення - цілком звичайне явище в мережах змінного струму. При цьому таке явище може стати помітним тільки з поширенням світлодіодних ламп і електроніки з імпульсними блоками живлення. Для усунення ефекту в контексті світіння ламп найчастіше досить усунути першопричину - правильно підключити вимикач у розрив фазного проводу, а не нульового.

Для того, щоб енергозберігаюча або светодиодная (і взагалі будь-яка з електронною схемою) лампа не мигала у виключеному стані, треба паралельно їй увімкнути резистор з опором 1 МОм і потужністю 0,5 Вт.

Опір може бути в межах від 100 кОм до 1,5 МОм і залежить від конкретних умов. Потужність резистора опором більш 510 кОм теоретично може бути менш 0,1 Вт, але на практиці - не менш 0,5 Вт, а краще 1 Вт. Потужність збільшується зі зниженням опору. Вона розраховується по відомій формулі

$$P = \frac{U^2}{R}. \qquad (1)$$

Наприклад, якщо доводиться ставити резистор 100 кОм, то його потужність розсіювання, буде 0,48 Вт, із запасом – 1 Вт. А якщо 10 кОм – потужність треба брати не менш 5 Вт.

Резистор обов'язково ізолювати (краще використати термоусадку). Помістити його можна біля патрона лампи або в розподільчій коробці.

Це1 спосіб відмінно працює в будь якому разі, оскільки природа його однакова – на фазний провід приходить слабкий потенціал, який повільно накопичується на конденсаторі фільтра, і через якийсь час напруги на конденсаторі (десятки вольтів) стає досить для запуску схеми електронного баласту або для світіння светлодіодов.

Висновок. Як показує практика, світіння светлодіодної лампи після вимикання - це завжди симптом. Він указує або на проблеми самої лампи, наприклад, низька якість або несумісність із димером, або на особливості кола керування (вимикач із підсвічуванням), або на проблеми в електропроводці.

УДК 62-83: 681.5
Назарова О.С.[1], Русяк О.Г. [2]
[1] доц. НУ «Запорізька політехніка»
[2] асп. НУ «Запорізька політехніка»

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ СТАНА ХОЛОДНОЇ ПРОКАТКИ НА ОСНОВІ ДАНИХ МОНІТОРИНГУ

Сучасні стани холодної прокатки характеризуються складною багатомасовою електромеханічною структурою та значною кількістю взаємопов'язаних електроприводів клітей, моталок і допоміжних механізмів. Забезпечення високої якості регулювання швидкості та натягу металевої стрічки потребує застосування інтелектуальних систем автоматичного керування, здатних адаптуватися до змін технологічних параметрів і режимів роботи. Одним із ключових джерел інформації для синтезу таких систем є база даних добового моніторингу електромеханічних процесів стана холодної прокатки.

Архіви добового моніторингу містять масиви експлуатаційних даних щодо швидкостей електроприводів, електромагнітних моментів, струмів, навантажень, натягів між клітями та інших технологічних координат [1]. Використання цих даних дозволяє виконувати ідентифікацію параметрів багатомасової електромеханічної системи, уточнювати математичні моделі електроприводів та враховувати реальні нелінійності механічних зв'язків. Аналіз накопиченої інформації забезпечує можливість виділення типових режимів роботи стана, дослідження перехідних процесів під час розгону, гальмування та зміни швидкості прокатки [2].

На основі архівних даних можуть бути реалізовані алгоритми машинного навчання для формування інтелектуальних законів керування електроприводами клітей. Використання історичних даних дає змогу створити предиктивні моделі зміни навантаження та натягу стрічки, що забезпечує випереджувальне коригування керуючих впливів. Крім того, база даних добового моніторингу може застосовуватися для адаптивного налаштування регуляторів швидкості та моменту, а також для мінімізації коливань у багатомасовій системі стана холодної прокатки [3, 4].

Важливою перевагою використання архіву є можливість виявлення нестандартних режимів роботи, перевантажень та коливальних процесів, що створює передумови для реалізації функцій інтелектуальної діагностики та прогнозування технічного стану електроприводів [5, 6]. Отримані результати можуть бути використані для створення цифрового двійника електромеханічної системи стана та перевірки алгоритмів керування без втручання у реальний технологічний процес.

Отже, використання бази даних добового моніторингу електромеханічних процесів є ефективним інструментом для синтезу інтелектуальної систе-

ми автоматичного керування електроприводом стана холодної прокатки, що дозволяє підвищити точність регулювання, зменшити динамічні навантаження та забезпечити енергоефективну роботу електромеханічної системи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Formánek I., Farana R. Load torque impact on interstand section control of continual rolling mills. Proceedings of the 2016 17th International Carpathian Control Conference ICCC. 2016. P. 206–209. URL: https://doi.org/10.1109/CarpathianCC.2016.7501094.

2. Zhang Y., Zhang K., Peng K., Yang P. A New Multiphase Process Monitoring Method with Application to a Hot Rolling Mill Process. 2022 China Automation Congress (CAC). Xiamen, China, 2022. P. 927–932. URL: https://doi.org/10.1109/CAC57257.2022.10055617.

3. Nazarova O., Rusiak O. Fuzzy logic technologies in the diagnostic system of electromechanical processes of the cold rolling mill. Energy. Tbilisi, 2023. № 3(107). P. 10–15.

4. Назарова О. С., Васильєв Б. В., Шокуров Д. Р. Удосконалення системи діагностики стана холодної прокатки на основі бази даних його електромеханічних процесів. Електротехніка та електроенергетика. 2023. № 1. С. 7–18. URL: https://doi.org/10.15588/1607-6761-2023-1-1.

5. Gütgemann S. та ін. Radar-Based High Precision Thickness Measurement for Rolling Mills. 2018 15th European Radar Conference (EuRAD). Madrid, Spain, 2018. P. 122–125. URL: https://doi.org/10.23919/EuRAD.2018.8546618.

6. Nazarova O., Rusiak O. Systems for intelligent monitoring and predictive diagnostics of cold rolling mills electric drives. Development Trends in Technical Sciences in EU Countries and Ukraine: Intern. scient. conf. (Riga, October 1–2, 2025). Riga: Baltija Publishing, 2025. P. 40–43. URL: https://doi.org/10.30525/978-9934-26-612-6-10.

УДК 681

Скнар К.П.[1], Казурова А.Є.[2]
[1]асп. НУ «Запорізька політехніка»
[2]доц. НУ «Запорізька політехніка»

ПРОБЛЕМИ ВИКОРИСТАННЯ ГЕОРАДАРІВ НА МАЛИХ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТАХ ДЛЯ ГЛИБИННОГО ЗОНДУВАННЯ ТА ПОШУКУ ПІДЗЕМНИХ ОБ'ЄКТІВ

Інтеграція георадарних (GPR) систем у платформи малих безпілотних літальних апаратів (БпЛА) є одним із перспективних напрямів розвитку дистан-

ційного зондування Землі. Використання БпЛА для пошуку підземних об'єктів і глибинного картографування дозволяє підвищити оперативність обстеження територій, забезпечити доступ до важкодоступних або небезпечних ділянок та зменшити ризики для персоналу, що є особливо важливим у задачах гуманітарного розмінування, археології та моніторингу інженерних мереж. Водночас практична реалізація таких систем супроводжується низкою технічних обмежень.

Однією з ключових проблем є обмежена вантажопідйомність малих БпЛА, що зумовлює необхідність компромісу між характеристиками антенної системи та масою обладнання [1]. Одним з важливих напрямків досліджень є підвищення ефективності систем енергоживлення. Енергетична щільність акумуляторів визначає тривалість польоту та допустиме корисне навантаження БпЛА. Перспективними є кремній-вуглецеві (Si–C) акумулятори, у яких кремній забезпечує високу теоретичну ємність (до ~4200 мА·год/г) та поліпшені температурні режими [2], у порівнянні зі звичними Li–полімерними акумуляторами. Їх застосування потенційно дозволяє або зменшити масу енергосистеми, або збільшити тривалість польоту, однак такі рішення потребують подальших експериментальних досліджень у складі БпЛА.

Суттєвою проблемою є загасання електромагнітного сигналу та втрати енергії на межі «повітря–ґрунт». Значний контраст діелектричних властивостей призводить до відбиття частини сигналу, що знижує ефективність зондування та ускладнює виявлення малорозмірних об'єктів. Також значний вплив мають паразитні відбиття від рослинності та неоднорідність ґрунту. Зміни вологості, засоленості та типу ґрунту визначають діелектричні властивості середовища, що впливає на швидкість поширення сигналу та глибину зондування [3]. Ці фактори призводять до спотворень сигналу та зниження якості зображень.

Для підвищення роздільної здатності та якості зображень застосовуються алгоритми синтезованої апертури (SAR), які забезпечують фокусування сигналу та покращення інтерпретації даних GPR [4]. Критичним фактором є забезпечення високоточної навігації БпЛА. Це особливо важливо для SAR-систем, де відхилення траєкторії призводять до дефокусування зображень [5]. Використання RTK-позиціонування дозволяє досягати сантиметрової точності та забезпечує коректну геоприв'язку вимірювань [6]. Підвищення точності також досягається шляхом інтеграції GPR із додатковими сенсорами. Зокрема, LiDAR використовується для побудови цифрових моделей поверхні (DSM), що дозволяє враховувати мікрорельєф і геометрію зйомки [7].

У сукупності зазначені підходи дозволяють підвищити точність реконструкції підповерхневих структур і зменшити вплив похибок, пов'язаних із рухом платформи та властивостями середовища.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. López Y. Á. та ін. Unmanned Aerial Vehicle-Based Ground-Penetrating Radar Systems: A review. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine. 2022. Vol. 66. 86 pp.

2. Mahmood S. A. та ін. Silicon Carbide (SiC) and Silicon/Carbon (Si/C) Composites for High-Performance Rechargeable Metal-Ion Batteries. Int. J. Mol. Sci. 2025. Vol. 26, № 16.

3. Noviello C. та ін. An Overview on Down-Looking UAV-Based GPR Systems. Remote Sensing. 2022. Vol. 14, № 14.

4. Gonzalez-Diaz M. та ін. Improvement of GPR SAR-Based Techniques for Accurate Detection and Imaging of Buried Objects. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2019. Vol. 3126. P. 3138.

5. Garcia-Fernandez M., Alvarez-Lopez Y., Las Heras F. Autonomous Airborne 3D SAR Imaging System for Subsurface Sensing: UWB-GPR on Board a UAV for Landmine and IED Detection. Remote Sensing. 2019. Vol. 11, № 20.

6. Niu Z. та ін. Accuracy Assessment of UAV Photogrammetry System with RTK Measurements for Direct Georeferencing. ISPRS Annals of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2024. P. 169–176.

7. Karušs J. та ін. UAV and GPR Data Integration in Glacier Geometry Reconstruction: A Case Study from Irenebreen, Svalbard. Remote Sensing. 2022. Vol. 14, № 3.

УДК 681.5

Томін Д.С.[1], Казурова А.Є.[2]
[1]асп. НУ «Запорізька політехніка»
[2]доц. НУ «Запорізька політехніка»

ПРОГНОЗУЮЧЕ КЕРУВАННЯ ВІДЦЕНТРОВИМ КОМПРЕСОРОМ НА ОСНОВІ МОДЕЛІ

Для відцентрового компресора енергоощадність досягається не «грубим» відкриттям антипомпажного клапана, а прогнозним утриманням робочої точки поблизу межі помпажу з узгодженим керуванням приводом, зворотним клапаном і (за наявності) вхідним направляючим апаратом. Ключові резерви – розширення робочої зони, мінімізація рециркуляції та застосування частотно-регульованого приводу. Оптимальним є Model Predictive Control (MPC), оскільки задача багатозмінна й обмежена; він забезпечує більший запас до помпажу, менші енерговитрати та швидші перехідні процеси порівняно з PID.

Помпаж – небезпечна низьковитратна нестійкість із коливаннями тиску й витрати аж до реверсу потоку, що спричиняє перегрів, вібрації та ризик пошкодження. Водночас максимальна ефективність досягається поблизу межі стійкості: завищений запас знижує ККД, занижений – неприйнятний за безпекою. Класичні антипомпажні схеми забезпечують захист через рециркуляцію/скид газу, але з енергетичними втратами. Тому мета – максимальний робочий діапазон без зайвої рециркуляції з урахуванням зсуву межі помпажу при зміні складу газу; на часткових навантаженнях додатковий ефект дають зворотний клапан і перетворювач частоти.

Для синтезу MPC у реальному часі доцільно використовувати редуковану нелінійну модель сімейства Грейтцера/Мура–Грейтцера зі швидкісно-залежною картою компресора, а не CFD. Практичний керувальний варіант можна записати як

$$\dot{\omega} = \frac{1}{J}(\tau_d - \tau_c), \qquad \dot{\psi}_c = \frac{1}{T_\psi}(\psi_{ss}(\dot{m},\omega) - \psi_c), \qquad \dot{m} = \frac{A_c}{L_c}(p_1\psi_c - p_2),$$

$$\psi_{ss} = c_0(\omega) + c_1(\omega)\dot{m} + c_2(\omega)\dot{m}^2 + c_3(\omega)\dot{m}^3, \qquad P_e \approx \frac{\tau_d\,\omega}{\eta_d}.$$

де ω – швидкість ротора, τ_d – момент привода, τ_c – компресорний момент, ψ_c – підйом тиску/pressure ratio coefficient, $\dot{m}$ – масова витрата, P_e – електрична потужність.

Така структура прямо випливає з control-oriented моделей, використаних у роботах з MPC для антипомпажних систем керування, а сам Грейтцер-модельний клас вважається усталеним стандартом для моделювання помпажу у відцентрових компресорах.

Типова архітектура включає вимірювання (витрата, тиски всмоктування/нагнітання, температури, швидкість, положення клапана), оцінювач стану, прогнозну модель, online-оптимізатор і актуатори (привід, recycle- та інколи зворотний клапан). У промислових MPC-рішеннях застосовують EKF, покрокову лінеаризацію та розв’язання QP у реальному часі; керування може бути багатоканальним (швидкість, recycle-, зворотний клапан). Водночас MPC не замінює захисну логіку – аварійне відключення залишається окремим рівнем. Базовим для впровадження є лінійний MPC з QP, достатній у межах робочої області. За широких змін режимів (швидкість, властивості газу, карта) доцільні SQP-MPC або NMPC. Явний MPC забезпечує надшвидкі обчислення, але масштабується обмежено; у лінійних задачах QP зазвичай розв’язують методами interior-point.

Критичний етап – ідентифікація: потрібні компресорна карта, дані повне/часткове завантаження, параметри лінії помпажу, а також транзієнтні записи

швидких клапанних збурень. У верифікації промислових досліджень модель узгоджували з таблицями даних стаціонарного стану, карт продуктивності та динамічними переходами; для Грейтцер-подібних моделей параметри на кшталт L_c часто доводиться підлаштовувати за експериментом. Мінімальний набір критично важливих параметрів для надійної дії антипомпажу: витрата, p_{suc}, p_{dis}, а за потреби корекції карти – також T_{suc} і/або T_{dis}.

За частотою керування антипомпажний контур належить до «швидких»: у літературі фігурують вимоги порядку десятків мілісекунд. Для вбудованих реалізацій показано працездатність циклів 20–150 мс, а для сучасних PLC/промислових контролерів – середні часи розв'язання в мілісекундах при T_s = 50 мс, тобто нижче вибраного sampling time. Це означає, що QP-рівень сьогодні є цілком промислово реалістичним, а SQP/RTI (Sequential Quadratic Programming/Real Time Iteration) – також досяжним на високопродуктивних контролерах.

У моделюванні MPC/TASC спрацьовував на ~100 мс раніше за класичний антипомпаж, утримував більшу відстань до межі та зменшував викиди під час перехідних процесів, що знижує питомі енерговитрати. Експерименти підтвердили: запас до помпажу зріс до 11%, час встановлення скоротився до 50%.

Отже, для відцентрового компресора загального призначення рекомендована цільова архітектура така: перетворювач частоти + recycle-клапан + MPC верхнього рівня, який мінімізує P_e і $\dot{m}_r$ при жорстких помпаж/температура/обмеження виконавчих механизмів.

УДК.621.354.82

Зіновкін В.В.[1], Васильєва Є.В.[2], Потапенко Є.Є.[3], Расторгуєв Д.Б. [4],
Богма А.О[5].
[1]проф. НУ «Запорізька політехніка»
[2] старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»
[3] доц. НУ «Запорізька політехніка»
[4] асп. НУ «Запорізька політехніка»
[5] студ. гр. Е-514 НУ «Запорізька політехніка»

ОПТИМІЗАЦІЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ В СКЛАДІ МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ В УМОВАХ МЕТАЛУРГІЙНОГО ВИРОБНИЦТВА

Вступ. Електропривод постійного струму доволі багато часу не мав конкурентів при використанні регулювання механічних систем, а по окремим практичним показникам залишається незмінним до теперішнього часу. Іншою перевагою двигуна постійного струму є можливість використовувати як в якості двигуна, так і в якості генератора. Останнім можливо скористатись

при примусових механічних переміщеннях окремих потужних механізмів або пристроїв, які поєднанні з електроприводом.

При вирішенні завдань оптимізації' електротехнічного і електротехнологічного устаткування в металургійній промисловості важливе значення набувають питання узгодженості їх електричних параметрів. Особливого значення набувають питання впливу перевантажень та коливань напруги. Найбільш поширеним є електроприводи із двигунами постійного струму оскільки вони дозволяють ефективно переміщувати потужні робочі механічні пристрої різних металургійних комплексів.

Об'єктом дослідження є електромагнітні та електромеханічні процеси, що формуються в машині постійного струму в залежності від характерів навантаження відповідно до роботи на енергоємних металургійних підприємствах.

Актуальність дослідження полягає в доцільності оптимізації електромагнітних параметрів в електромеханічних системах з двигунами постійного струму для покращення техніко-економічних показників та енергозаощадження.

Мета роботи – пошук шляхів оптимізації електромагнітних параметрів двигунів постійного струму для більш ефективного використання двигуна та енергозаощадження.

Наукова новизна запропонованих методів дослідження полягає в розробці нових методологічних підходів та методів дослідження взаємного впливу електромагнітних та електромеханічних процесів, що відбуваються в електромеханічній системі при різних видах навантаження.

Вона складається із взаємодіючих активних елементів, електричних і механічних перетворювачів енергії, управляючих і інформаційних мікропроцесорних пристроїв та системи узгодженості із електричними і механічними ланцюгами. Останні виконують переміщення потужних органів технологічного процесу відповідно до директивного завдання. Напрямки, що виділені жирним шрифтом означають силові канали електроприводу передачі енергії та її перетворення в механічну.

Рух виконавчих механізмів здійснюється відповідними електромеханічними системами в складі електричних машин. Аналогічні приклади мають місце при роботі доменних печей, кранових механізмів та інших електротехнологічних процесів.

Практична цінність полягає в можливості техніко-економічних досліджень в кранових механізмах електрометалургійної промисловості при роботі двигуна постійного струму в режимах навантаження та вільного ходу при дії вантажу.

В системах автоматизованого електроприводу стійкість роботи досягається шляхом використання мікропроцесорних і програмних засобів автоматизації при цьому послідовну обмотку не використовують.

Для розгляду поставленої мети коротко розглянемо процеси, що впливають не робочі характеристики двигуна постійного струму.

Електромагнітні процеси в машині постійного струму формуються системою збудження електромагнітного поля. Значна частина магнітного потоку замикається по магнітній системі, а менша представляє поле розсіювання, яке не зчіплюється з якорем, і розповсюджується в просторі машини. Магнітна система характеризується нелінійними властивостями електротехнічної сталі, тому основний магнітний потік залежить від величини напруги нелінійно. Електромагнітне поле розсіювання змінюється лінійно в залежності від струму. При навантаженні машини, в наслідок взаємодії електромагнітних параметрів, виникають вихрові струми та електродинамічні зусилля в системі збудження електромагнітного поля розсіювання які сприяють зростанню або спаданню (демпфуванню) динамічних характеристик машини. Це призводить до погіршення оптимального використання електричної енергії і, як наслідок, погіршення ефективності електромеханічної системи в цілому.

Класична схема електроприводу постійного струму генератор-двигун, що приведена на рис.1, відзначається дуже корисними властивостями. Тому вона поширено використовується в металургійній промисловості при досить великих потужностях.

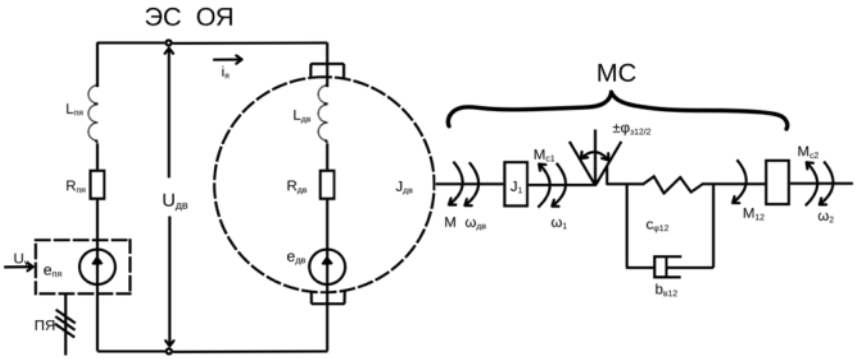


Рисунок 1. – Структурна схема електромеханічної системи генератор-двигун.

Режими перетворення електричної енергії здійснюються за допомогою тиристорного перетворювача з імпульсно-фазовим управлінням, що живиться від промислової мережі.

В обох розглянутих випадках основним елементом електромеханічної системи є двигун постійного струму. Від його властивостей суттєво залежить

ефективність використання електричної енергії та відповідних технологічних процесів в металургійній промисловості. Тому розглянемо фізичні процеси, що відбуваються в просторі машини постійного струму з метою пошуку оптимального її використання.

Математична модель якірних ланцюгів машини постійного струму розроблено з врахуванням наступних припущень:

– магнітний потік збудження залишається не змінним;
– опір і індуктивність не змінюються при симулюванні;
– використовується одномасова механічна система;
– момент механічного опору також постійний;
вплив зовнішніх і внутрішніх збуджень відсутній.

При додержані приведених умов математичний опис електромагнітних процесів, що відбуваються в якірних ланцюгах, представимо в операторній формі наступними рівняннями:

$$e_{пя}(t) - e_{дв}(t) = R_{яц} * \left(1 + T_{яц} * p\right) * i_я(t)\ ; \quad (1)$$

$$e_{дв}(t) = k * \Phi * \omega(t)\ ; \quad (2)$$

$$M(t) = k * \Phi * i_я(t)\ ; \quad (3)$$

$$M(t) - M_c(t) = J_э * p * \omega(t), \quad (4)$$

Структурна схема математичної моделі, що дозволяє симулювати взаємні зв'язки між параметрами електромагнітного процесу при відповідних режимах навантаження приведені на рис.2 і рис.3.

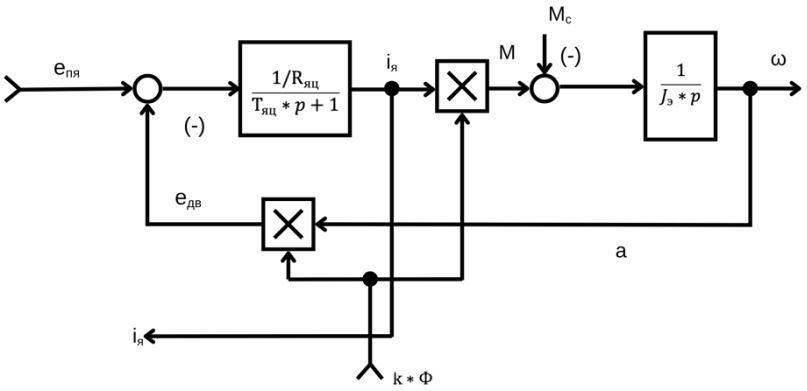


Рисунок 2. – Структурна схема математичної моделі двигуна постійного струму незалежного збудження при управлінні напругою якоря.

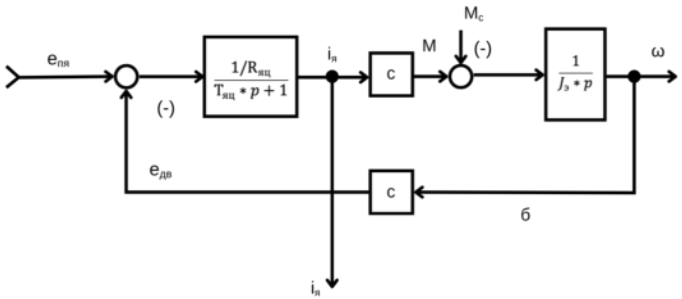


Рисунок 3. – Структурна схема математичної моделі двигуна постійного струму незалежного збудження при постійному номінальному потоці збудження.

При постійному потоку збудження електромагнітний стан двигуна описується наступними передавальними функція:

– по управлінню при Мс=0 та Мс= const

$$W_y(p) = \frac{\omega(t)}{e_{пя}(t)} = \frac{\Delta\omega(t)}{\Delta e_{пя}(t)} = \frac{\frac{1}{k*\Phi}}{T_м*T_{яц}*p^2+T_м*p+1}; \quad (5)$$

– по збудженню при епя =0 або епя = const

$$W_в(p) = \frac{\omega(t)}{-M_c(t)} = \frac{\Delta\omega(t)}{\Delta-M_c(t)} = \frac{\frac{R_{яц}}{(k*\Phi)^2}*(T_{яц}*p+1)}{T_м*T_{яц}*p^2+T_м*p+1} \quad (6)$$

Динаміка протікання електромагнітних процесів в електроприводі пояснюється в доповіді.

Результати дослідження приведено на рис.4.

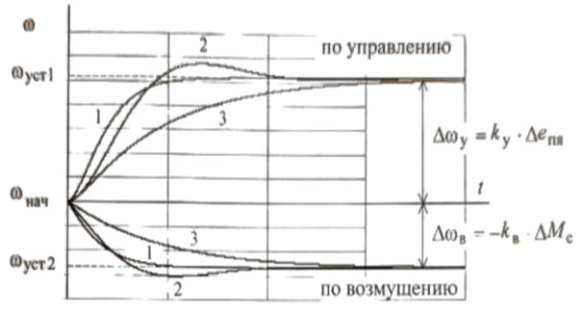


Рисунок 4. – Перехідні електромагнітні параметри двигуна постійного струму в залежності від обертової швидкості на валу при відповідних.

Дослідження показали, що при дотриманні поточного значення струму номінальним та додержанні теплового охолодження і змінні обертової частоти в діапазоні від Wmin до Wmaks ділиться на наступні межі:

В межі 1 регулювання здійснюється зміненням напруги, яка підводиться до двигуна постійного струму при постійному потоці збудження і умовах навантаження:

В межах 2 має місце зменшення потоку збудження при додержані номінальної напруги і додержані умов примусового утримання режиму:

Якщо вважати, що момент власного тертя на валу електричної машини при регулюванні обертової частоти не змінюється, тоді використання повної потужності в межі 1 дотримується при постійному моменті, а в межі 2 – при постійній потужності на його валу – механічного навантаження.

Аналіз результатів дослідження показав, що основними факторами формування нестаціонарного перехідного процесу в двигуні постійного струму вбачаються наступні:

– нелінійні властивості магнітної проникності електротехнічної сталі магнітної системи в залежності від інтенсивності поля (див. рис. 5);

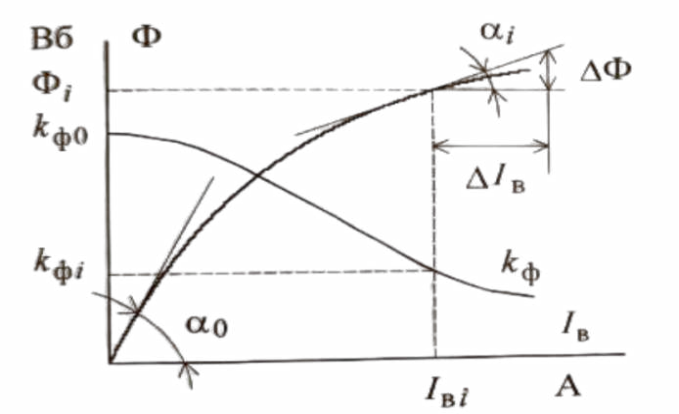


Рисунок 5 – Нелінійна залежність потоку в магнітній системі і струму намагнічування в залежності від струму збудження електромагнітного поля розсіювання та лінеаризація нелінійних властивостей.

– наявність поля розсіювання головних полюсів;
– вплив поля розсіювання на місцеві втрати в елементах конструкції;
– взаємна індукція між ланцюгами якоря та збудження;
– вихрові струми в масивних деталях і магнітній системі;
– змінення обертової швидкості привідного генератору.

УДК. 621.314.2:621.3.016.33
Zinovkin V.[1], Tretiakov A.[2], Zakharov I.[3] Petythov S.[3]
[1] professor NU «Zaporizhzhia Polytechnic»
[2] graduate student NU «Zaporizhzhia Polytechnic»
[3] student Gr. E-612 NU «Zaporizhzhia Polytechnic»

STUDY OF THE DYNAMICS OF REALLOCATION OF HEAT FLOWS IN AIR-COOLED TRANSFORMERS

The technical condition of dry transformers significantly depends on a number of cause-and-effect factors that lead to the deterioration of the relevant structural elements, subsequent reductions in reliability and emergency failures. One of the determining factors is the temperature loads of the active elements of the structure, which are proportional to the additional losses excited by the electromagnetic scattering field in the cavity of the transformer. Temperature overloads lead to accelerated deterioration of the dielectric properties of insulation, pressing of fastening units, deterioration of galvanic connections and changes in the mechanical and electromagnetic state of active structural elements.

The relevance of the work lies in the biased emergency failures of dry transformers by monitoring changes in the determining electromagnetic load parameters and the corresponding thermal loads of active structural elements.

The object of the study is the dynamics of the redistribution of optimization thermal loads of the electromagnetic scattering field excitation system and the magnetic system in comparison with the load parameters of the dry transformer.

The scientific novelty consists in the experimental study of the redistribution of electromagnetic and thermal parameters, the dynamics of which informs about the formation of deviations in the active elements of the structure and, in the presence of critical cumulative effects, leads to an emergency exit of the transformer.

The practical value lies in the development of a specialized device for the prevention of emergency failure of dry transformers in extremely unfavorable operating conditions and force majeure circumstances.

Scientific and technical tasks regarding the development of the theory of reliability depend on the specification of the technical orientation and are as follows:

- a task for determining the technical condition at a specific moment in time of the diagnostic category in the literal sense (current technical condition);
- the task of predicting the impact of damage to structural parts or the condition of the transformer as a whole in the future (forecasting to adjust the periodicity of preventive and repair work);
- the task of determining the state in which the transformer was located in the past (to establish the cause-and-effect factors that led to the accident in order to develop technical measures and modernization requirements).

The proposed work is devoted to the development of the first task of diagnosing the technical condition of dry transformers depending on the redistribution of heat flows between the active elements of the structure.

The purpose of the work is to develop technical proposals for preventing emergency failures and diagnosing the current technical condition of dry transformers.

In the process of operation of dry transformers in nominal modes, active structural elements are heated at levels that should not exceed those standardized by regulatory and technical documentation. When the load or the action of other adverse factors is exceeded, the temperature levels of the active elements of the structure, and especially the excitation system of the electromagnetic scattering field and the magnetic system, increase. At the same time, the redistribution of heat flows between them depends on the nature of the development of damage.

The parameters of the redistribution of the heat load of the excitation system and the magnetic system, as well as the optimization coefficients ξс.в and ξм.с, will be used when determining the current technical condition of the transformer. At the same time, the redistribution of heat flow between active elements depends on the losses of electromagnetic energy Qc.v and Qm.s (Qc.v).

The load mode is characterized by the fact that heat loads occur in it, both of the excitation system and reflect the overexcitation of the magnetic system. Therefore, when studying the current technical condition of the transformer, this load mode reflects the totality of the influence of electromagnetic and thermal parameters. The changes between them reflect some deviations in the design. From a physical point of view, in this mode, active parts of the structure can be considered as independent sources of thermal energy.

Based on the solution of the mathematical model given in the first report, it can be seen that the thermal load of the excitation system of the magnetic scattering field is proportional to the resistance of the windings and the square of the current value of the short-circuit current and voltage, and of the magnetic system -– to the free-running voltage

$$U_{(t)} = 1/T \int_0^T \mathrm{U}_{\mathrm{м}} \sin(\omega t + \varphi_2)$$

Optimization thermal eo coefficients

$$\xi_k = \frac{\tau_k}{I^2(t)}, \qquad \xi_X = \frac{\tau_X}{U^2(t)}$$

depend on heat flow redistribution gradients. Optimization thermal coefficients ξ do not change with nominal load parameters and non-scaled structural

elements. With some deviations in the design, these coefficients change relative to the initial ones and can be used to diagnose the current technical condition of the dry transformer.

On the basis of the obtained analytical connections of the redistribution of heat flows between the system of excitation of the electromagnetic field of scattering and the magnetic field of the system, a system of automated analysis of the current technical condition of the dry transformer was developed, the structural diagram of which is given in the figure.

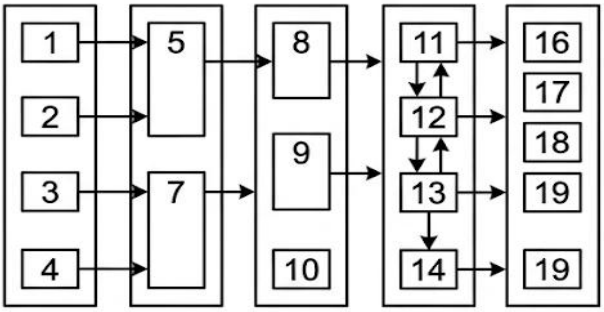


Figure 1 - Structural diagram of a specialized automated device for analyzing the current technical condition of dry transformers based on the dynamics of heat load gradients between active structural elements.

The following designations are adopted in the figure: 1. research object - dry transformer; 2. sources of thermal radiation of the system of excitation of the dosed electromagnetic field; 3. magnetic system (MS); 4. load parameters (i(t); u(t); P(t); Q(t); ω(t)); 5. microprocessor and software tools for processing and converting current information; 6. S.Z.; 7. MS; 8. block of structuring and consistency of thermal and electrical parameters; 9. heat flows (redistribution) between S.Z. and MS; 10. characteristic features of the electrical load (exceedance, multiplicity, frequency fluctuations and deviations, non-sinusoidality); 11. levels of exceeding parameters and their averaging; 12. magnetic flux in MS and direction of heat flows; 13. averaging and sampling within time; 14. forecasting of the further state; 15. block of information prevention of emergency failure; 16. visualization of the growth and redistribution of heat flows; 17. extrapolations of further development of the cumulative effect; 18. operational and service personnel; 19. executive mechanism of forced disconnection of the object.

The work of the proposed scientific and technical solution is research, the results of which are given in the reports.

Conclusions:

1. The analysis of experimental studies in comparison with theoretical calculations showed that the error of finding the temperature load of the windings of the excitation system by using optimization thermal coefficients does not exceed 10%.

2.The obtained scientific and practical results indicate the expediency of using the proposed method of thermal loading of active elements in practice, engineering calculations, design, diagnostics, and prevention of emergency failures of transformers.

УДК 621.314.2:621.3.016.33

Зіновкін В.В.[1],Третяков А.О.[2], Кірюніна А.Є.[3]
[1]прф. НУ «Запорізька політехніка»
[2] асп. НУ «Запорізька політехніка»
[3] студ. гр. Е-612 НУ «Запорізька політехніка»

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РОЗПОДІЛУ ТЕПЛОВИХ ПОТОКІВ В СУХИХ ТРАНСФОРМАТОРАХ

В процесі роботи сухих трансформаторів в номінальних режимах активні елементи конструкції нагріваються до рівнів які не повинні перевищувати нормовані нормативно-технічною документацією. При перевищені навантаження або дії інших несприятливих факторів рівні температури активних елементів конструкції, і, особливо системи збудження електромагнітного поля розсіювання і магнітної системи зростають. При цьому, перерозподіл теплових потоків між ними залежать від характеру розвитку пошкоджень або певних дефектів. Перевищення температурних навантажень призводить до послідовного накопичення кумулятивного ефекту, скорочення термінів надійності і аварійних ситуацій. Для упередження аварійних виходів із ладу сухих трансформаторів запропоновано скористатись відповідними оптимізаційними тепловими коефіцієнтами, поточний моніторинг і аналіз яких дозволяє оцінювати перерозподіл теплових потоків між активними елементами конструкції. і передбачити в якому із них має місце розвиток пошкодження.

По градієнтам змінення теплового перевантаження можливо прогнозувати терміни аварійного виходу із ладу трансформатора або застосувати певні технічні заходи по усуненню несприятливих факторів.

Актуальність роботи спонукається вимогами практики щодо покращення термінів надійності сухих трансформаторів та більш ефективного використання електричної енергії в промисловості.

В процесі роботи електротехнічного устаткування мають місце різні фактори, які призводять до послідовного скорочення термінів надійності і їх неможливо передбачити без використання певних науково-технічних методів. Надійність трансформаторного устаткування оцінюється, переважно,

методами експериментального дослідження діелектричних властивостей ізоляції, рівнів грозових і імпульсних напруг, опорів короткого замикання і вільного ходу, загальних рівнів шуму та в спектрі октавних частот та ін. Порівняльний аналіз динаміки змінення поточних параметрів електромагнітного походження свідчить про розвиток певного несприятливого фактора в об'єкті [7]. При перевищенні відповідних показників, або одного із них, виконуються технічні заходи щодо упередження аварійного виходу із ладу трансформатора або його модернізації [9-11].

Складність визначення технічного стану трансформаторного устаткування полягає в тому, що він залежить від низки факторів різного фізичного походження таких як електромагнітні, електромеханічні, електродинамічні, хімічні, високовольтні, теплові, магнітострикційні, стримери, умови експлуатації та ін. процеси.

Об'єктом дослідження є оптимізаційні теплові коефіцієнти теплових потоків між системою збудження електромагнітного поля розсіювання і магнітною системою в залежності від наявності несприятливих факторів в них, їх розвитку та режимів навантаження.

Питанням діагностики трансформаторного устаткування присвячено доволі велика кількість науково-технічних джерел. В кожному із них розглядаються окремі питання стану ізоляційних властивостей охолоджуючого середовища або трансформаторної олії, стану ізоляторів, частковим розрядам і грозовим імпульсам в порожнинні трансформатора, електродинамічній стійкості, шумовим характеристикам, втратам холостого ходу та короткого замикання.

Наукова новизна роботи полягає в розробці математичної моделі і оптимізаційних коефіцієнтів, що характеризують перерозподіл теплових потоків в порожнині сухого трансформатора між системою збудження електромагнітного поля розсіювання і магнітопроводом в залежності від перевантаження та формування і подальшого розвитку кумулятивного ефекту.

Практична цінність роботи полягає у можливості визначення розвитку несприятливих факторів, що призводять до скорочення термінів надійної роботи сухих трансформаторів які відзначаються значно більшими кратностями струмів включення, щільністю масо-габаритних показників, відсутністю примусового охолодження та умовами експлуатації.

Теплові процеси в активних і неактивних елементах конструкції можливо використати для встановлення причин порушення технічного стану активних елементів конструкції і трансформатора в цілому.

Найбільш впливовими є магнітна система і система збудження електромагнітного поля розсіювання (обмотки).

Оскільки охолодження активних елементів здійснюється шляхом конвенції повітряного середовища, то порушення оптимального теплового навантаження можливо використати для встановлення порушення в конструкції.

Особливої специфічної спрямованості такі питання набувають в трансформаторах, що живлять ємнісні, різкозмінні, електромеханічні, перетворюючі та нестаціонарні види навантаження.

Математична модель теплових потоків при умові стабілізації теплового режиму, представляємо наступними диференціальними рівняннями:

- для первинної обмотки

$$Q_{C.B.1} = \alpha_{C.B.1} \frac{d\tau_{C.B.1}}{dt} + q_{C.B.1} \cdot \tau_{C.B.1} + q_{C.B.2}(\tau_{C.B.1} - \tau_{C.B.2})\Big|_{\tau_{C.B.}=const}; \qquad (1)$$

- для вторинної обмотки

$$Q_{C.B.2} = \alpha_{C.B.2} \frac{d\tau_{C.B.2}}{dt} + q_{C.B.2} \cdot \tau_{C.B.2} + q_{M.C}(\tau_{C.B.2} - \tau_{M.C})\Big|_{\tau_{C.B.}=const} \qquad (2)$$

- для стрижня магнітної системи

$$Q_{M.C} = \alpha_{M.C} \frac{d\tau_{M.C}}{dt} + q_{M.C} \cdot \tau_{M.C} + q_{M.C}(\tau_{M.C} - \tau_{C.B.2})\Big|_{\tau_{M.C}=const}. \qquad (3)$$

В рівняннях (1) - (3) принято наступні позначення: α – коефіцієнт теплоємності; q – коэфіцієнт тепловіддачі; τ – перевищення температури активних деталей конструкції трансформатора; Q – втрати електромагнітної енергії. Индексы (с.в.1), (с.в.2) і (м.с.) означають притаманність даної величини первинній обмотці, вторинній обмотці системи збудження магнітного поля і стрижню магнітної системи, відповідно.

Безперервність теплових потоків між активними деталями задовольняється наступними умовами:

$$\frac{d\tau_{C.B.1}}{dt} = \frac{d\tau_{C.B.2}}{dt} = \frac{d\tau_{M.C}}{dt} = 0\Big|_{\substack{\tau_{C.B}=const \\ \tau_{M.C}=const}} \qquad (4)$$

Теплове навантаження активних деталей буде інтегральним і вони є безпосередніним джерелом перетворення електричної енергії в теплову.

Рішення математичної моделі перерозподілу теплових потоків в залежності від наявності пошкоджень і навантаження отримуємо в наступному вигляді:

а) для первинної обмотки

$$\tau_{C.B.1} = \xi_{K.C.B.1} \cdot I_{1K}^2(t) + \xi_{X.C.B.1} \cdot U^2(t)(1 + \beta \cdot \Delta\tau_1)^{-1} \quad (5)$$

б) для вторинної обмотки

$$\tau_{C.B.2} = \xi_{K.C.B.2} \cdot I_{2K}^2(t) + \xi_{X.C.B.2} \cdot U^2(t)(1 + \beta \cdot \Delta\tau_2)^{-1} \quad (6)$$

де

– струм режиму короткого замикання у відповідних обмотках

$$I_{1K} = 1/T \int_0^T \mathrm{I_м} \sin(\omega t + \varphi_1)$$

– напруга вільного (холостого) ходу

$$U_{(t)} = 1/T \int_0^T \mathrm{U_м} \sin(\omega t + \varphi_2)$$

Iм і Uм – амплітудні значення струму і напруги, відповідно;
φ1,і φ2 – початкові фази струму і напруги, відповідно;
– оптимізаційні теплові коефіцієнти для досліду короткого замикання і вільного ходу, відповідно;

$$\xi_k = \frac{\tau_k}{I^2(t)}, \quad \xi_X = \frac{\tau_X}{U^2(t)}$$

β = (1 + kτ) – коэффициент змінення температурного навантаження в залежності від опору провідникового матеріалу із якого виготовлено обмотки.

Таким чином, на підставі змінення оптимізаційних коефіцієнтів можливо встановити часткові порушення в активних елементах конструкції сухого трансформатора.

Висновок: Отримано математичну модель розподілу теплових потоків в сухому трансформаторі. ЇЇ рішення представлено у вигляді відповідних теплових коефіцієнтів порушення яких свідчить про наявність конструктивних змін в активних елементах, що дозволяє діагнозувати подальший технічний стан трансформатора.

УДК 621.391
Романіченко Г.М.[1], Кривохлябов М.І.[2]
[1]старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»
[2]студ. гр. М-314 НУ «Запорізька політехніка»

ЕЛЕКТРОДВИГУНИ В ЕЛЕКТРОМОБІЛЯХ

Електродвигун є серцем електромобіля – він перетворює електричну енергію акумулятора в механічний крутний момент для приводу коліс. Від вибору типу двигуна залежать ефективність, маса, складність системи живлення й керування, вартість і сервісні вимоги автомобіля.

Найпоширеніші типи: синхронні двигуни з постійними магнітами (PMSM), асинхронні (індукційні) двигуни і двигуни з внутрішнім збудженням (синхронні ІЗ). PMSM забезпечують високу щільність потужності і кроковий крутний момент при компактних розмірах; вони широко використовуються в легкових EV через високу ефективність при типовому діапазоні швидкостей. Індукційні двигуни прості в конструкції і дешевші за PMSM у плані матеріалів (менше або без рідкоземельних магнітів), вони витримують високі пікові навантаження і мають хорошу надійність. Синхронні двигуни з внутрішнім збудженням дають гнучкість регулювання реактивної потужності й можуть працювати без рідкоземельних матеріалів, але потребують додаткової електроніки для збудження.

Ключові параметри двигуна: номінальна і пікова потужність, крутний момент, максимальна частота обертання, ККД у робочих точках, маса і інерція ротора. Важливе значення має крива ККД в залежності від обертів і навантаження — оптимальна трансмісія й електроніка зберігають споживання енергії в межах найефективніших зон. Система керування двигуном (інвертор і контролер) визначає можливості рекуперації, якість переходів моменту і загальну енергетичну ефективність. Сучасні інвертори використовують SiC- або IGBT-перемикачі для зниження втрат та підвищення щільності потужності; топологія фазних інверторів і алгоритми векторного керування критичні для продуктивності. Охолодження ротора й статора, термальний менеджмент та захист від перегріву визначають тривалість пікових режимів і довговічність двигуна. Оптимальний теплообмін дозволяє зберегти високі показники ККД при інтенсивних прискореннях і підйомах. Магніти і матеріали статора впливають на вартість і екологічність виробництва: рідкоземельні магніти підвищують щільність потужності, але підвищують вартість і залежність від ринку матеріалів. Альтернативні конструкції (менше магнітів або двигуни з внутрішнім збудженням) знижують залежність від рідкоземельних елементів.

Передавальні механізми: прямий привід (single-speed) застосовується в більшості EV через простоту та високу ефективність; багато швидкісні коробки використовуються рідше для підвищення економічності при різних ре-

жимах руху. Прямий редуктор дозволяє мінімізувати втрати і підвищити надійність системи.

Ефективність впливає на запас ходу: підвищення ККД двигуна та зменшення втрат у електроніці безпосередньо збільшує пройдену відстань на одній зарядці. Реальні критерії вибору враховують компроміс між ціною, масою, доступністю матеріалів і експлуатаційними характеристиками.

Рекуперація енергії при гальмуванні залежить від можливостей інвертора і керування: плавна інтенсивна рекуперація підвищує енергоефективність і зменшує знос механічних гальм. Налаштування рекуперації має враховувати комфорт водія й безпеку, а також теплові обмеження акумулятора. Шум, вібрації і жорсткість конструкції ротора/статора впливають на абсолютну зручність і акустичний комфорт; дизайн зубців і контроль струмів знижують гармоніки та вібрації. Електромагнітна сумісність і фільтрація живлення потрібні для запобігання перешкодам у бортових системах.

Сервіс і надійність: електродвигуни мають менше рухомих частин, ніж ДВЗ, що знижує потребу в техобслуговуванні; однак інвертор і датчики потребують контролю і термального захисту. Термін служби залежить від якості підшипників, герметичності, охолодження і режимів експлуатації.

Інновації: використання SiC-перетворювачів, оптимізованих матеріалів сталі для статорів, багатошарових ротів, і нові алгоритми керування (AI-підходи) підвищують ККД і динаміку. Зростання автоматизації виробництва й нові матеріали знижують собівартість і підвищують масове впровадження.

Екологічні аспекти: вторинна переробка магнітів і сталі, зменшення використання рідкоземельних елементів і збільшення ресурсу двигунів знижують загальний вплив на довкілля. Дизайн із урахуванням утилізації полегшує компонування та зменшує витрати на утилізацію після експлуатації.

Кількісні орієнтири: типова потужність електродвигунів легкового EV — від 50 до 300 кВт; щільність потужності сучасних PMSM часто перевищує 3–6 кВт/кг. ККД у робочих точках може становити 90–96% для сучасних синхронних двигунів із постійними магнітами.

Рекомендації для вибору двигуна залежно від класу автомобіля на момент 2025 р.:

– Міські малолітражки - електричний привід (single-speed); за відсутності зарядки - бензин 1.0–1.2 з MHEV.

– Субкомпакти / компактні хетчбеки - PHEV або BEV; якщо немає зарядки - турбо-бензин 1.0–1.5.

– Середній клас (седан/універсал) - PHEV або HEV; BEV при пріоритеті екології; бензин 1.5–2.0 як альтернатива.

– Бізнес / преміум - BEV; PHEV як проміжний варіант; потужні ДВЗ 2.0–4.0 л для частих далеких поїздок.

– Кросовери / компактні SUV - BEV для міста; PHEV для змішаного використання; 2.0–2.5 (дизель/бензин) для важчих і буксирувальних варіантів.

– Повнорозмірні SUV / позашляховики - гібриди з великим крутним моментом або потужні ДВЗ 3.0+; у люкс-сегменті - великі BEV-платформи.

УДК 621.317.39

Івлєв Д.І.[1], Вовк Є.А[1]., Назарова О.С.[2], Мелешко І.А.[3]
[1] студ. гр. Е-714 НУ «Запорізька політехніка»
[2] доц. НУ «Запорізька політехніка»
[3] асист. НУ «Запорізька політехніка»

ПІДВИЩЕННЯ ЧУТЛИВОСТІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ ШЛЯХОМ ОПТИМІЗАЦІЇ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ

Актуальність теми дослідження зумовлена сучасними вимогами до підвищення точності, надійності та ефективності електромеханічних вимірювальних систем, які широко застосовуються у сфері енергетики, промислового виробництва, наукових лабораторіях та метрології. Незважаючи на стрімкий розвиток цифрових та електронних приладів, електромеханічні системи зберігають своє значення завдяки простоті конструкції, високій стабільності роботи, стійкості до зовнішніх впливів, а також можливості тривалого використання без значного технічного обслуговування. Одним із ключових параметрів ефективності таких систем є їх чутливість, яка визначає здатність приладу виявляти навіть мінімальні зміни вимірюваних величин, що особливо важливо при контролі електричних і фізичних параметрів у режимі реального часу [1].

Метою даного дослідження є підвищення чутливості електромеханічних вимірювальних систем шляхом систематичної оптимізації їх конструктивних параметрів. Наукова новизна роботи полягає у комплексному підході до аналізу та моделювання впливу геометрії рухомих елементів, характеристик магнітних систем, параметрів пружних елементів та механічних втрат на чутливість приладу. Вперше здійснено одночасне поєднання аналітичного моделювання, математичного аналізу та експериментальної перевірки для визначення оптимальних конструктивних рішень, що дозволяють максимізувати відхилення стрілки при мінімальних вхідних змінах величини, не ускладнюючи при цьому конструкцію системи.

Об’єктом дослідження є електромеханічні вимірювальні системи різного типу, включаючи амперметри, вольтметри та універсальні вимірювальні прилади, а предметом — конструктивні параметри цих систем і їх вплив на чутливість і точність вимірювань. У роботі застосовано аналітичні методи,

чисельне моделювання та лабораторні експерименти, що дозволило визначити кореляцію між параметрами магнітопроводу, масою рухомої частини, моментом протидії, кількістю витків обмотки та величиною відхилення стрілки приладу.

Дослідження показало, що підвищення чутливості досягається за рахунок:

-збільшення магнітного потоку та оптимізації форми магнітопроводу;

-зменшення маси рухомих частин приладу для зниження інерційних втрат;

-оптимального підбору параметрів пружних елементів для забезпечення адекватного відновлювального моменту;

-мінімізації тертя у вузлах обертання та з'єднаннях рухомих частин;

-узгодження електромеханічних характеристик обмоток з конструкцією магнітної системи для максимального перетворення електромагнітного впливу у механічне відхилення стрілки [2].

Наукова новизна полягає також у запропонованій методології комплексної оптимізації конструктивних параметрів, яка дозволяє збільшити чутливість приладів без додаткового ускладнення їх конструкції та зберегти стабільність і довговічність роботи. Результати дослідження можуть бути використані як при проєктуванні нових електромеханічних вимірювальних приладів, так і при модернізації існуючих систем, що сприяє підвищенню точності вимірювань, розширенню функціональних можливостей приладів та впровадженню інноваційних підходів у сфері електротехнічної метрології [3].

Таким чином, комплексна оптимізація конструктивних параметрів електромеханічних вимірювальних систем дозволяє значно підвищити їх чутливість, що має практичне значення для точного контролю електричних величин у промислових і наукових додатках, а також відкриває нові перспективи у створенні адаптивних і високоточних вимірювальних пристроїв.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Brailovsky V. та ін. Electronic Measurement System for IoT Sensors Studying. Security of Infocommunication Systems and Internet of Things. 2023. Vol. 1, № 2. Art. 02003. URL: https://doi.org/10.31861/sisiot2023.2.02003.

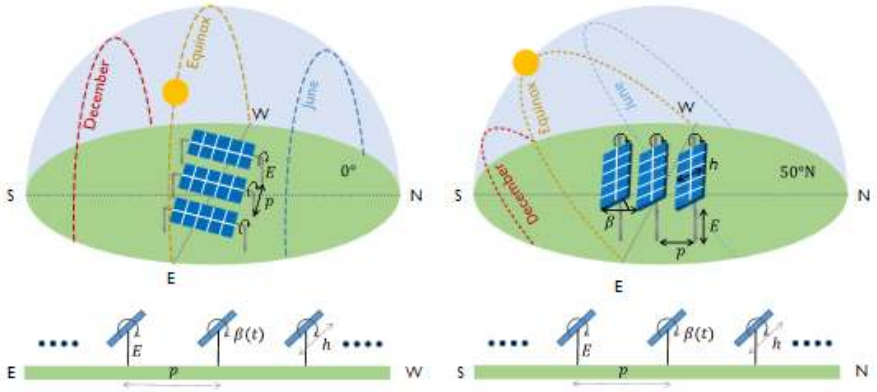
2. Velychko O., Gordiyenko T. Evaluation of the long-term drift of electrical capacitance measurement standards by two methods. Ukrainian Metrological Journal. 2024. № 2.

3. Мельник В. Г. та ін. Підвищення стійкості до дії шумів високочутливих вимірювальних каналів сенсорних систем. Технічна електродинаміка. 2021. № 1. С. 84–91.

УДК 621.391
Величко Є.В.[1], Осадчий В.В.[2], Кулиніч Е. М.[2]
[1]студ. гр. Е-312 НУ «Запорізька політехніка»
[2] доц. НУ «Запорізька політехніка»

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ ШЛЯХОМ ВІДСТЕЖЕННЯ КУТА СОНЦЯ

Проблема оптимізації генерації електроенергії сонячними панелями набуває особливого значення в умовах зростаючих енергетичних викликів та необхідності переходу до відновлюваних джерел енергії. Ефективність фотогальванічних модулів суттєво залежить від кута падіння сонячних променів; максимальна генерація досягається при положенні панелі, перпендикулярному до напрямку сонячного випромінювання. Враховуючи добові та сезонні коливання положення Сонця, застосування стаціонарних конструкцій призводить до неповного використання інсоляції й зниження коефіцієнта корисної дії [1, 2]. Відхилення від нормалі на кожні 10° зменшує ККД приблизно на 1,5–2 %, що за рік може призводити до втрат 20–30 % потенційно можливої генерації [3].



а – орієнтація на схід-захід (E-W); б – орієнтація на північ-південь (N-S).
Рисунок 1 - Схема сонячної фотоелектричної ферми

Метою дослідження є розробка та апробація алгоритмів відстеження кута сонячних променів із застосуванням астрономічних моделей для інтеграції з механізмами автоматичного регулювання нахилу і повороту панелей. Визначення положення Сонця базується на обчисленні двох критичних параметрів — висоти (sin α) та азимута (cos γ):

$$sin\alpha = sin\delta \cdot sin\phi + cos\delta \cdot cos\phi \cdot cosH \qquad (1)$$

$$cos\gamma = \frac{sin\delta \cdot cos\phi - cos\delta \cdot sin\phi \cdot cosH}{cos\alpha}, \quad (2)$$

де δ — деклінація Сонця; φ — географічна широта місця встановлення; H — годинний кут, що залежить від часу доби.

Розраховані кути використовуються мікроконтролером системи керування для подачі сигналів на сервоприводи, які змінюють орієнтацію панелей у двох площинах (азимут та кут місця). Сучасні трекінгові системи реалізуються за двома основними принципами: активний метод (використання фотодатчиків для визначення напрямку максимальної освітленості) та пасивний розрахунковий метод (використання астрономічних рівнянь з прив'язкою до реального часу та GPS-координат). Найкращі результати демонструють комбіновані системи, де астрономічна модель задає базову траєкторію, а датчики виконують точне підлаштування при хмарності чи відбитому світлі [4, 5].

Аналіз і практичні дослідження свідчать про підвищення продуктивності систем відстеження на 15–35 % порівняно зі статичними панелями [6, 7]. Одноосьові системи трекінгу (поворот за азимутом) забезпечують додаткові 15–25 % виробітку, двовісні системи (поворот за азимутом та кутом місця) — додаткові 25–35 % [8]. Важливим технічним аспектом є енергоспоживання самої системи трекінгу: сучасні сервоприводи з інтелектуальним керуванням споживають у середньому 0,5–2 % від додатково згенерованої енергії, що робить їх застосування енергетично вигідним [9]. Водночас застосування механізмів трекінгу пов'язане з підвищенням капітальних витрат та вимог до обслуговування, однак сучасний розвиток автоматизації й зниження вартості компонентів суттєво мінімізують ці недоліки. Економічний аналіз свідчить, що додаткова генерація електроенергії компенсує збільшені капітальні витрати протягом прийнятного терміну, особливо для СЕС потужністю понад 10 кВт [9].

Подальший розвиток технологій пов'язаний із застосуванням штучного інтелекту для прогнозування хмарності та оптимізації трекінгу, інтеграцією з системами накопичення енергії для вирівнювання добового графіка генерації, а також використанням легких композитних матеріалів для конструкцій трекерів, що знижує навантаження на приводи та підвищує надійність.

Впровадження алгоритмічних систем корекції кута сонячних панелей на основі точних астрономічних моделей є ефективним технологічним заходом підвищення продуктивності сонячних електростанцій на 15–35 % [6, 7]. Це сприяє більш раціональному використанню сонячної інсоляції, підвищенню енергетичної автономності об'єктів, зменшенню викидів CO_2 та прискорює окупність інвестицій у відновлювану енергетику.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Козлов В. В., Гузей Я. О. Сонячна енергія як джерело електричної енергії. Збірник тез доповідей щорічної науково-практичної конференції. Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2021. С. 162–165.

2. Козлов В. В., Набокова О. В. Алгоритм розрахунку сонячної електроустановки для приватного будинку. Збірник тез доповідей щорічної науково-практичної конференції. Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2023. С. 207–209.

3. Mousazadeh H. та ін. A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2009. Vol. 13, No. 8. P. 1800–1818.

4. Li Z. та ін. Enhancement of photovoltaic output by dual-axis solar tracking. Renewable Energy. 2021. Vol. 172. P. 456–468.

5. Han M. та ін. Optimization of solar panel tilt angles for maximum energy generation. Energy Conversion and Management. 2020. Vol. 208. P. 112–119.

6. Kazem H. A., Chaichan M. T., Kazem Z. H. Solar tracking system structures and driving techniques: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2013. Vol. 21. P. 107–121.

7. Kumar R., Garg H. P., Saini J. S. Performance study of photovoltaic module by considering the solar tracking system. Solar Energy. 2016. Vol. 134. P. 186–198.

8. Tripathy M., Parida B., Ranjan R. Design and implementation of automatic solar tracking system for photovoltaic panel. International Journal of Engineering Research & Technology. 2018. Vol. 7, Issue 6. P. 385–390.

9. Al-Rousan N., Isa N. A. M., Desa M. K. M. Advances in solar photovoltaic tracking systems: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. Vol. 82. P. 2548–2569.

УДК 621.313.323

Yachmenov V.[1], KrysanYu. [2]
[1] student of group A-G3.15 NU “Zaporizhzhia Polytechnic”
[3] associate professor, NU " Zaporizhzhia Polytechnic"

CURRENT STATE AND PROSPECTS OF DEVELOPMENT OF SWITCHED RELUCTANCE DRIVE

The Switched Reluctance Drive (SRD) is currently one of the most rapidly devel-oping areas of modern electromechanics. Intensive development of SRD has been carried out for approximately the last thirty years by many universities, re-

search centers, and companies in almost all industrially developed countries of the world (Germany, Great Britain, Sweden, Italy, USA, Australia, Japan, etc.) [1-3].

The main advantages of SRD compared to traditional electric drives are associated with the exceptional simplicity of design, high reliability, and manufacturability of the electric machine used (SRM). It is based on a specific feature: the number of salient poles on the stator and rotor differs, and the windings are made in the form of concentrated coils located exclusively on the stator poles.

The operation of the SRM is based on a well-known physical principle: a ferro-magnetic material in a magnetic field experiences a force tending to move it into the region of greatest field strength. This force, called reluctance force in electromechanics, causes the salient-pole ferromagnetic rotor of the SRM to follow the periodically changing magnetic field of the stator, ensuring its rotation [4].

The primary function of the SRD is energy conversion; therefore, its energy char-acteristics are of paramount importance. This necessitated the use of various design approaches — ranging from the selection of electromagnetic loads to the development of control algorithms and other technical solutions.

To date, the primary scientific and technical tasks have been solved: the functional composition of the electric drive has been substantiated and requirements for its structural elements have been formulated; an analysis of the physical patterns of SRM functioning based on various mathematical models has been performed; conceptual approaches to the construction of control algorithms have been developed, some of which have already been practically implemented.

The main result of this stage of SRD development was the identification of the areas of its greatest efficiency. First and foremost, these are mass industrial instal-lations — such as pumps, fans, conveyors, and other units where the transition to adjustable speed drives is taking place. In addition, the prospects for using SRD in household appliances, small vehicles, as well as in a number of specialized fields have been confirmed, which expands the range of its potential use and emphasizes the versatility of the technology.

Despite the advantages of SRD recognized by specialists and the positive experi-ence of its practical application, the mass distribution of this drive is still limited. The main reason is that its potential benefits are realized only through the use of specialized control algorithms. At the same time, the specificity of the SRD requires the development of tools different from those traditional for classical electric drive systems.

For further expansion of application areas and successful competition with modern adjustable speed drives, it is necessary to improve the consumer properties of the SRD, as well as to conduct a comprehensive assessment of the conditions and possibilities for implementing specified operating modes depending on the parameters of the drive and the control system. Such an approach will make it possible to form rational control algorithms in each specific case, taking into ac-

count the entire range of requirements and ensuring optimal use of the SRD advantages.

Research on SRD is indeed subject to constraints related to the features of the SRM machine itself. The most significant among them are the discreteness of control and substantial changes in the state of the motor's magnetic system over a wide range. At the same time, it is the consideration of these factors in the control algorithms that is a necessary condition for building a drive with high operational and consumer characteristics. Therefore, the availability of methods and tools for analysis and synthesis capable of adequately reproducing real processes in the SRD acquires special significance.

However, the objective complexity of the physical processes determining the drive's operation mentioned above makes the analytical description of SRD operation very cumbersome and, in some cases, difficult to implement. For this reason, traditional methods of electric drive research using block diagrams, coordinate transformations, vector diagrams, etc., prove to be ineffective for SRD. Modern achievements in computing technology have strengthened the importance of mathematical modeling, allowing not only for establishing relationships between parameters and control but also for reproducing the system's functioning over time with the simulation of elementary processes. Such models are called simulation models.

The mass implementation of SRD is associated with the transition to digital control systems and simulation modeling, which ensure the realization of its key ad-vantages — reliability, energy efficiency, and structural simplicity.

REFERENCES

1. Sun Yu-Xue, Mu Hai-Wei, Gao Jing-Hua. Design and protection of the controller for SRD system. Proceedings of the 7th International Conference on Machine Learning and Cybernetics (ICMLC). Kunming, China, 2008. P. 1380–1384. URL: https://doi.org/10.1109/ICMLC.2008.4620724.

2. Xu Yongfang, Wang Xintang, Xu Zhifeng, Zhang Yulin. Analysis and application of control strategy for switched reluctance drive with position sensor. Proceedings of the 2019 IEEE 8th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC 2019). Jinan, China, 2019. P. 124–128. URL: https://doi.org/10.1109/ITAIC.2019.8785465.

3. Cheng He та ін. Adaptive variable angle control in switched reluctance motor drives for electric vehicle applications. Journal of Power Electronics. 2017. Vol. 17, № 6. P. 1512–1523. URL: https://doi.org/10.6113/JPE.2017.17.6.1512.

4. Guojun Yu, He Cheng, Yingjie Huo. Research on the switched reluctance machine drive system for electric vehicles. Proceedings of the 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS 2014). Hangzhou, China, 2014. P. 3020–3024. URL: https://doi.org/10.1109/ICEMS.2014.7013479.

УДК 621.311:712.25
Матяш Д. О.[1], Шаханов А. Є.[1], Назарова О.С.[2]
[1]студ. Е-315м НУ «Запорізька політехніка»
[2]доц. НУ «Запорізька політехніка»

ПРОЄКТУВАННЯ АВТОНОМНОЇ ЕНЕРГОСИСТЕМИ РОЗУМНОГО ПАРКУ «ДУБОВИЙ ГАЙ» НА БАЗІ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

В умовах нестабільності роботи об’єднаної енергосистеми України та ризиків тривалих блекаутів питання децентралізації енергопостачання стратегічних рекреаційних зон набуває особливої актуальності. Міські парки, будучи центрами масового скупчення людей, зазвичай повністю залежать від централізованих мереж. Метою даної роботи є розробка концептуального проєкту автономної мікромережі (Microgrid) для центрального парку «Дубовий гай» (м. Запоріжжя) площею 57 га.

Для коректного підбору обладнання проведено енергетичний аудит трьох ключових підсистем споживання. Адаптивне освітлення на базі 1000 LED-ліхтарів, керованих за протоколом DALI з датчиками руху, потребує 150 кВт·год на добу. Телекомунікаційна мережа (150 точок Wi-Fi 6 та 200 камер відеоспостереження) споживає 126 кВт·год. Зарядна інфраструктура на базі 100 смарт-лавок забезпечує додаткове навантаження у 30 кВт·год. З урахуванням технологічних втрат на інвертацію та опір ліній (15%), загальна добова потреба об’єкта становить приблизно 352 кВт·год.

Генерація енергії реалізується за допомогою сонячної електростанції встановленою потужністю 100 кВт. Проєктом передбачено використання 230 двосторонніх (Bifacial) фотомодулів, інтегрованих в архітектуру парку у вигляді тіньових навісів. Це дозволяє використовувати альбедо поверхні для підвищення ККД системи на 10-15%. Керування потоками потужності здійснюється каскадом із трьох гібридних інверторів по 40 кВт кожен, що забезпечує відмовостійкість за стандартом N-1.

Для стабілізації системи в нічний час та періоди низької інсоляції застосовано акумуляторний масив LiFePO4 ємністю 400 кВт·год. Такий обсяг накопичувача створює необхідний інженерний запас міцності (Safety Factor), що запобігає глибокому розряду комірок та гарантує автономність критичних систем протягом похмурих днів.

Впровадження запропонованої системи дозволяє перетворити парк на енергонезалежний «острів безпеки», здатний одночасно забезпечувати зв’язком до 15 000 користувачів та надавати послуги підзарядки 400 пристроїв одночасно, не створюючи навантаження на міську енергомережу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Мармут І. Технічна діагностика автомобілів: навч.-практ. посібник. Сєвєродонецьк, 2020. 158 с.

УДК 004.942:681.51

Шматало Я. С.[1], Осадчий В. В.[2], Кулиніч Е. М.[2]
[1] студ. гр. Е-312 НУ «Запорізька політехніка»
[2] доц. НУ «Запорізька політехніка»

ВИКОРИСТАННЯ ІМІТАЦІЙНИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

Впровадження технології віртуального введення в експлуатацію (Virtual Commissioning) є одним із найбільш перспективних напрямів сучасної промислової автоматизації. Ця технологія дозволяє проводити налагодження керуючого програмного забезпечення на цифрових моделях ще до етапу монтажу фізичного обладнання.

Незважаючи на існування спеціалізованих апаратних комплексів Hardware-in-the-Loop (наприклад, Typhoon HIL), що призначені для надшвидких процесів у силовій електроніці, більшість типових технологічних задач раціональніше вирішувати за допомогою комп'ютерного програмного забезпечення. Концепції Model-in-the-Loop (MiL) та Software-in-the-Loop (SiL) виступають більш розповсюдженими та гнучкими інструментами розробки.

Структура програмно-апаратного комплексу для імітаційного моделювання за принципом Model-in-the-Loop (MiL) та зовнішній вигляд д контролера і пульта керування для системи Model-in-the-Loop, де модель об'єкта та алгоритм керування функціонують у єдиному програмному середовищі, представлена на рис. 1,2.

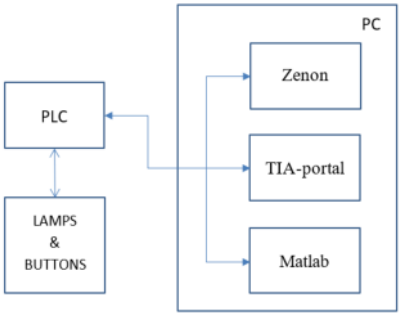


Рисунок 1 – Структура програмно-апаратного комплексу



Рисунок. 2 – Зовнішній вигляд контролера і пульта керування для системи Model-in-the-Loop

Використання суто програмних імітаційних моделей має низку переваг у випадках, коли не потрібна мікросекундна швидкодія реального часу:

– **економічність**: відсутність потреби у дорогому специфічному обладнанні (симуляторах реального часу) значно зменшує бюджет проєкту;

– **гнучкість**: програмні моделі у MATLAB/Simulink (Simscape) легко піддаються масштабуванню та зміні конфігурації без перекомутації фізичних пристроїв;

– **доступність**: тестування можна проводити на звичайному робочому ПК, використовуючи стандартні протоколи зв'язку, такі як OPC UA або S7 Communication, для взаємодії з віртуальними контролерами.

Такий підхід дозволяє перетворити звичайний комп'ютер на повноцінне випробувальне середовище, що забезпечує високу точність відтворення фізичних процесів (механічних, гідравлічних) та безпечну верифікацію коду керування, мінімізуючи витрати на розробку систем автоматизації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Lechler T. та ін. Virtual Commissioning – Scientific review and exploratory use cases in advanced production systems. Procedia CIRP. 2019. Vol. 81. P. 1125–1130. URL: https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.278.

2. Лазарєв Ю. Ф. MATLAB і моделювання динамічних систем: навч. посібник. Київ: НТУУ «КПІ», 2009. 63 с. URL: https://cions.kpi.ua/Arhiv/Lazarev/uml_4n.pdf.

3. Mahnke W., Leitner S.-H., Damm M. OPC Unified Architecture. Berlin; Heidelberg: Springer, 2009. 339 p. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-540-68899-0.

УДК.621.31
Тертишний О.В.[1], Івлєв Д.І.[2], Крисан Ю.О.[3], Васильєва Є.В.[4]
[1] студ. гр. Е- 315сп НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. Е- 714 НУ «Запорізька політехніка»
[3] доц. НУ «Запорізька політехніка
[4]старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

СИСТЕМА ГЕНЕРАЦІЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ НА БАЗІ СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ

Україна володіє колосальними ресурсами сонячної енергії, тому очевидно, що подальший розвиток національної економіки має бути тісно пов'язаний з її активним використанням. Незважаючи на відносно високу вартість фотоелектричних перетворювачів, сонячна фотоенергетика сьогодні демонструє найвищі темпи зростання серед усіх відновлюваних джерел енергії (50-60% на рік). Гарантоване автономне енергопостачання споживачів малої та середньої потужності, особливо тих, що проживають у віддалених районах, може бути ефективно організоване шляхом створення автономних сонячних фотоелектричних станцій (СФЕС) з електрохімічними накопичувачами енергії. При розробці таких систем необхідно враховувати сезонну та добову нерівномірність надходження сонячного випромінювання у різних регіонах, а також передбачати використання накопичувачів для покриття дефіциту електроенергії в темний час доби. Найбільш вживаними є електрохімічні накопичувачі: акумуляторні батареї (АБ), а також водневі системи з використанням електролізних установок та паливних елементів. Актуальним та перспективним напрямком вдосконалення СФЕС є застосування у їх складі багаторівневих напівпровідникових перетворювачів. Такі топології мають низку суттєвих переваг у порівнянні з класичними дворівневими перетворювачами: вони дозволяють покращити якість генерованої електричної енергії без збільшення частоти широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Завдяки отриманню точнішої апроксимації форми генерованих сигналів можна досягти значного зниження масогабаритних та вартісних показників вихідних фільтрів. Також при проектуванні з'являється можливість використовувати силові ключі з меншою номінальною напругою (колектор-емітер або стік-витік), що також позитивно позначається на загальній вартості СФЕС. Типова структура СФЕС, окрім сонячних фотоелектричних модулів, зазвичай містить DC/DC та DC/AC напівпровідникові перетворювачі, акумуляторну батарею, вихідний фільтр та трансформатор. Останній виконує функції гальванічної розв'язки та узгодження рівня вихідної напруги з мережею або навантаженням (рисунок 1). Важливим компонентом системи є вихідний фільтр, призначений для подавлення електромагнітних завад (пульсацій), особливо при роботі СФЕС на мережу. Залежно від вимог до якості формованого струму чи напруги, мо-

жуть застосовуватися різні види L- та LC-фільтрів. Як правило, для подавлення синфазного струму витоку в системах на базі сонячних модулів та напівпровідникових перетворювачів використовуються симетричні або асиметричні типи фільтрувальних дроселів.

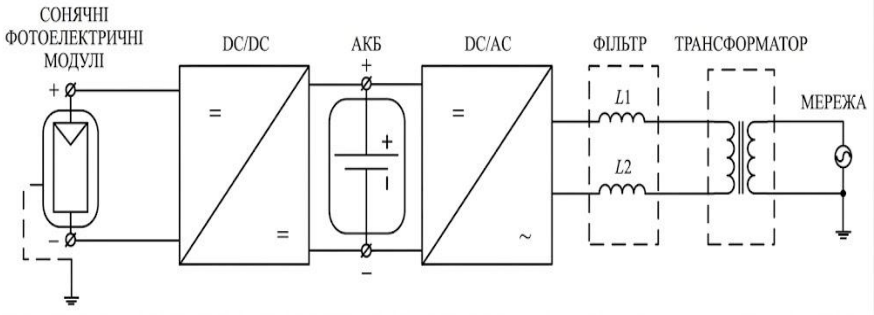


Рисунок 1 – Структура СФЕС

Впровадження автономних сонячних фотоелектричних станцій є критично важливим для енергозабезпечення споживачів України. Застосування сучасних багаторівневих напівпровідникових перетворювачів у поєднанні з ефективними системами фільтрації дозволяє не лише гарантувати надійність енергопостачання, а й суттєво покращити якість генерованої електроенергії, одночасно знижуючи вартість та габарити обладнання. Це робить такі системи технічно досконалими та економічно привабливими для широкого впровадження.

УДК 621.311.4
Бондар Н.С. [1], Гордієнко І.С[1], Назарова О.С.[2], Мелешко І.А.[3]
[1] студ. гр. Е-714 НУ «Запорізька політехніка»
[2] доц. НУ «Запорізька політехніка»
[3] асист. НУ «Запорізька політехніка»

ДОСЛІДЖЕННЯ ТОЧНОСТІ ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ІНДУКЦІЙНИХ ЛІЧИЛЬНИКІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

Актуальність теми зумовлена широким застосуванням індукційних лічильників електричної енергії в системах обліку, особливо в побутовому та промисловому секторах. Незважаючи на активне впровадження електронних засобів обліку, індукційні лічильники залишаються поширеними завдяки своїй надійності, простоті конструкції та тривалому терміну експлуатації. Водночас питання точності вимірювання та енергетичних втрат цих приладів

потребують детального дослідження, оскільки вони безпосередньо впливають на достовірність обліку електричної енергії [1].

Метою дослідження є аналіз точності вимірювання та енергетичних характеристик індукційних лічильників електричної енергії в умовах різних режимів навантаження. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання: дослідити принцип роботи індукційного лічильника, визначити основні фактори, що впливають на точність його показів, встановити залежність похибки від величини навантаження та коефіцієнта потужності, а також оцінити енергетичні втрати, що виникають під час роботи приладу.

Об'єктом дослідження є процеси вимірювання електричної енергії індукційними лічильниками, а предметом — їх метрологічні та енергетичні характеристики [2]. У роботі використано експериментальні методи дослідження, а також методи математичної обробки результатів і порівняльного аналізу. Принцип дії індукційного лічильника ґрунтується на взаємодії магнітних потоків, створюваних струмовою та напруговою котушками. У результаті цієї взаємодії виникає обертовий момент, який приводить у рух алюмінієвий диск. Швидкість обертання диска пропорційна активній потужності навантаження, а кількість обертів — спожитій електричній енергії. Водночас на точність вимірювання впливають різноманітні фактори, зокрема механічне тертя, магнітні втрати, зміна температури, а також відхилення коефіцієнта потужності від номінального значення [3].

У ході дослідження встановлено, що похибка індукційного лічильника має виражену залежність від рівня навантаження. При малих значеннях струму навантаження спостерігається значне зростання відносної похибки, що пояснюється недостатнім обертовим моментом для подолання сил тертя та впливом паразитних магнітних полів. Зі збільшенням навантаження похибка зменшується і досягає мінімальних значень у діапазоні номінальних режимів роботи. При перевантаженнях можливе повторне зростання похибки через насичення магнітної системи [4]. Окрему увагу приділено дослідженню енергетичних характеристик лічильника. Встановлено, що в процесі роботи виникають втрати енергії, зумовлені нагріванням обмоток, вихровими струмами в магнітопроводі та механічними втратами в опорах. Ці втрати залежать від режиму навантаження і можуть впливати на точність обліку, особливо при тривалій експлуатації приладу.У результаті проведеного дослідження встановлено основні закономірності зміни точності індукційних лічильників залежно від умов їх роботи. Показано, що найбільш точні результати досягаються при номінальних значеннях навантаження та коефіцієнта потужності, близького до одиниці. При відхиленні цих параметрів точність вимірювання знижується. Для підвищення точності обліку електроенергії доцільно застосовувати періодичну повірку приладів, оптимізувати режими їх роботи та враховувати вплив зовнішніх факторів.

Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення методів калібрування, підвищення ефективності експлуатації індукційних лічильників та покращення систем обліку електричної енергії загалом.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Собчук Д. С., Падалко А. М. Метрологія та електричні вимірювання: навч. посіб. Луцьк: ЛНТУ, 2023. 80 с.

2. Babak V. P., Kovtun S. I., Dekusha L. V. Metrology of heat flux measurements. Kyiv: Akademperiodyka, 2022. 122 с.

3. ДСТУ EN IEC 62053-22:2023. Засоби вимірювання електричної енергії. Спеціальні вимоги. Частина 22. Лічильники активної енергії змінного струму статичні (класів точності 0,1 S, 0,2 S та 0,5 S). Київ: Національний орган стандартизації, 2023. 32 с.

4. Velychko O. та ін. Measuring Systems for Calibration of Reference Electricity Meters. Proceedings of Lviv Polytechnic National University. Information Technologies and Control in Measurement Systems. 2026. Vol. 87, № 1. P. 70–77. URL: https://doi.org/10.23939/istcmtm2026.01.070.

УДК 621.311.1

Казурова А.Є[1]., Мелешко К.С.[2], Куделя К.В.[3]
[1] доц. НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. Е-315 НУ «Запорізька політехніка»
[3] студ. гр. Е-614 НУ «Запорізька політехніка»

INTELLIGENT ENERGY STORAGE SYSTEMS FOR AUTOMATED NETWORKS

Intelligent electrical networks (Smart Grids) represent a key component of modern energy systems due to their capability to integrate renewable energy sources, enhance reliability and efficiency of power supply, and enable bidirectional communication between generation, consumers, and energy devices. Energy storage systems (ESS) play a critical role in maintaining the balance between electricity generation and consumption, reducing peak loads, ensuring stability and power quality, and increasing the flexibility of the network. Storage systems allow excess energy to be stored during periods of low demand and released during peak loads or generation interruptions, which is particularly important for networks with a high share of renewable energy sources [1].

Energy storage technologies encompass a wide range of physical, chemical, and mechanical solutions, including lithium-ion batteries, pumped hydro storage, thermal storage, compressed air energy storage, and hydrogen-based systems. Each technology has specific characteristics, such as energy density, response time,

cycle life, and economic efficiency. Lithium-ion batteries are currently considered the most promising for integration into automated networks due to their high energy density, fast response to load fluctuations, and scalability.

Intelligent energy storage systems not only store energy but also implement adaptive energy flow management within the network. This is achieved through digital control algorithms, demand and generation forecasting, and big data analytics [2]. The application of artificial intelligence and machine learning algorithms enables the optimization of charging and discharging regimes, reduces the risk of overloads and energy losses, and improves the efficiency of interactions between network components in real time. Such approaches are particularly relevant for distributed energy systems with a large number of sources and consumers, where traditional management methods are often insufficient.

The integration of storage systems with renewable energy sources, such as solar and wind power, is a critical aspect of smart grid development. The intermittent nature of renewable generation can create imbalances in the network. Intelligent storage systems compensate for these fluctuations, ensuring stable and predictable energy supply. Efficient management in these conditions requires the development of forecasting strategies for renewable generation, optimal placement of storage systems within the network, and algorithms for extending their operational life cycle [3].

Key challenges in the development of intelligent energy storage systems include optimizing the location and capacity of storage units, ensuring economic efficiency, integrating with other smart grid components, and maintaining cybersecurity and operational reliability. A promising approach is the implementation of hybrid storage systems that combine multiple technologies to enhance adaptability and network reliability. The use of intelligent control algorithms, forecasting systems, and data analytics opens new opportunities to improve the efficiency and reliability of automated electrical networks.

In conclusion, intelligent energy storage systems are an integral element of modern automated networks [4]. They provide a balance between generation and consumption, maintain network stability and efficiency, facilitate the integration of renewable energy sources, and create prospects for further adoption of digital technologies and artificial intelligence algorithms in the energy sector.

REFERENCES

1. Merabet A. Smart Grid and Energy Storage: Innovations, Challenges, and Applications. Energies. 2026. Vol. 19, № 5. Art. 1251. URL: https://doi.org/10.3390/en19051251.

2. Mischos S., Dalagdi E., Vrakas D. Intelligent Energy Management Systems: A Review. Artificial Intelligence Review. 2023. Vol. 56. P. 11635–11674. URL: https://doi.org/10.1007/s10462-023-10441.

3. Empowering Smart Grid: A Comprehensive Review of Energy Storage Technology and Application with Renewable Energy Integration. Journal of Energy Storage. 2021. Vol. 39. Art. 102591. URL: https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102591.

4. Pudjianto D., Ramsay C., Strbac G. Smart Energy Systems and the Role of Energy Storage in Net Zero Power Networks. IEEE Transactions on Power Systems. 2024. Vol. 39. P. 1–15.

УДК 621.319.45

Волков В.О.[1], Піц-Степаненко А.О.[2]
[1] доц. НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. Е-612 НУ «Запорізька політехніка»

СУПЕРКОНДЕНСАТОРИ

Суперконденсатори (іоністори) — це гібриди конденсатора та хімічного джерела струму, що відрізняються надзвичайно високою ємністю (до 3000 Ф і більше), надшвидким зарядом (за лічені секунди) та високою потужністю, але низькою напругою (зазвичай 2,7–3,0 В на елемент). Вони витримують сотні тисяч циклів, безпечні, працюють при низьких температурах і мають низький внутрішній опір.

Ключові характеристики суперконденсаторів:

- ємність: Від декількох фарад до тисяч фарад (наприклад, популярні моделі на 10 Ф, 500 Ф, 3000 Ф);
- номінальна напруга: зазвичай 2,7 В — 3,0 В постійного струму, для роботи з більш високою напругою збираються в модулі;
- еквівалентний послідовний опір (ESR): дуже низький (частки міліом, мОм), що дозволяє віддавати високі струми;
- щільність потужності: висока, здатність швидко розряджатися і заряджатися;
- щільність енергії: нижча, ніж у акумуляторів, але вища, ніж у звичайних конденсаторів;
- робоча температура: широкий діапазон, часто від -40°C до +65°C, деякі до -60°C;
- термін служби: понад 100 000 — 1 000 000 циклів заряду/розряду без істотної втрати ємності;
- саморозряд: вищий, ніж у акумуляторів.

Переваги:

- практично необмежений термін служби.
- швидка зарядка.
- відмінна робота в екстремальному холоді.

Застосування: використовуються в системах, що вимагають миттєвої віддачі енергії або короткочасного живлення: пускові пристрої авто, електротранспорт, стабілізатори напруги, імпульсні лазери.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

Berrueta A. та ін. Supercapacitors: Electrical Characteristics, Modeling, Applications, and Future Trends. IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 50869–50896. URL: https://files01.core.ac.uk/download/pdf/231879254.pdf

УДК 621.391
Романіченко Г.М.[1], Кривохлябов М.І.[2]
[1]старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»
[2]студ. гр. М-314 НУ «Запорізька політехніка»

ДІАГНОСТИКА Й ПРЕДИКТИВНЕ ТЕХОБСЛУГОВУВАННЯ ЕЛЕКТРОСИСТЕМ АВТО

Діагностика виявляє відхилення в параметрах електросистем до перетворення їх на відмови. Предиктивне техобслуговування (PdM) планує втручання на основі прогнозів деградації і телеметрії.

Для діагностики використовують бортові інтерфейси (OBD/UDS), BMS, датчики струму, напруги і температури. Активні тести доповнюють пасивні виміри для точнішої локалізації дефектів. Ключові об’єкти моніторингу: батарея (елементи, модулі, BMS), силова електроніка (інвертори, перетворювачі), високовольтні ланцюги, роз’єми і датчики. Показники деградації: втрата ємності, зростання внутрішнього опору, перегрів, збільшення гармонік, корозія контактів і вібрації. Архітектура системи: збір даних на борту, локальна попередня обробка, передача в хмару, централізована аналітика і інтерфейс для сервісу. Локальна логіка виконує миттєві захисні дії, хмара дає прогнози і пріоритезацію обслуговування.

Алгоритми: порогові правила для критичних сигналів; регресія і класифікація для швидких прогнозів; RUL-моделі і глибоке навчання для складних залежностей. Комбінація фізичних моделей і даних підвищує точність і пояснюваність прогнозів. Частота зняття даних: напруга/струм - 1-10 Гц; температура - раз на хвилину; циклові метрики батареї - щоденно або за подіями. Для адекватного прогнозу потрібно 3-12 місяців регулярної телеметрії в залежності від інтенсивності експлуатації. Кількісні орієнтири: типова ємність легкового EV - 30-80 кВт·год; втрата ємності ~2-5% на рік; внутрішній опір може зростати на 10-30% за кілька років. Прагматичний приклад: при віддачі 10

кВт акумулятор 40 кВт·год може постачати енергію ~3-4 годин; це ілюструє вплив на експлуатаційні сценарії.

Економічний ефект: зниження незапланованих відмов, оптимізація запасних частин і графіків сервісу; для парку 100 авто скорочення простоїв на 30% може знизити витрати на 10-25%. Окупність системи залежить від вартості сенсорів, каналів зв'язку і витрат на розробку моделей. Ризики й обмеження: неточні або пропущені дані, відмови сенсорів, дрейф калібрувань, питання приватності і кібербезпеки, необхідність валідації моделей на реальних даних. Потрібна архітектура з шифруванням, політиками доступу і процедурою валідації моделей.

Інтеграція в сервісний цикл: три рівня реагування - миттєві захисти, попередження сервісу за 1-4 тижні, стратегічне планування замін за 3-12 місяців. Сервісні центри мають отримувати пояснювані діагнози і список пріоритетних завдань. Переваги для флотів: агрегована аналітика виявляє типові відмови, оптимізує закупівлю запчастин і знижує невизначеність прогнозів. Агрегація даних підвищує раннє виявлення проблем і економічну ефективність техобслуговування.

Рекомендації для впровадження: стандартизувати телеметрію й інтервали вимірів; впровадити захищені канали передачі; комбінувати фізичні моделі з ML; регулярно валідувати моделі. Додатково - вводити політику обміну даними між виробником, оператором флоту і сервісом для швидкої реакції.

УДК 621.314
Набокова О.В.[1], Сидоренко А.Ю.[2]
[1] доц. НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. Е-115 НУ «Запорізька політехніка»

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО РОЗТАШУВАННЯ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ ДЛЯ МАКСИМАЛЬНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ

Сонячні панелі зараз стають все більш популярними, особливо серед власників приватних будинків. Це пов'язано з тим, що вони дозволяють економити електроенергію і частково бути незалежним від загальної мережі. Багато хто думає що достатньо просто встановити панелі на даху і вони автоматично будуть працювати максимально ефективно. Але на практиці все трохи складніше, тому що правильне розташування має дуже великий вплив на кінцевий результат. Якщо встановити панелі не дуже вдало, вони все одно будуть працювати, але кількість отриманої енергії буде значно меншою.

Перш за все потрібно звернути увагу на освітлення протягом дня. Якщо на панелі падає тінь від дерев, сусідніх будівель, антен та інших речей, це може суттєво знизити ефективність. Причому навіть невелика тінь може

впливати на роботу всієї системи. Тому найкраще обирати максимально відкрите місце, де сонце буде світити більшу частину дня без перешкод. Важливим фактором є і кут нахилу панелей. Якщо кут занадто малий або занадто великий, сонячні промені не будуть попадати оптимально. У більшості випадків використовують приблизно 30-35°, але цей показник може змінюватися в залежності від місцевості і пори року. Наприклад взимку сонце знаходиться нижче, тому інколи кут роблять трохи більшим.

Орієнтація панелей також має велике значення. Найчастіше їх встановлюють у напрямку півдня, тому що саме так вони отримують найбільшу кількість сонячного світла протягом дня. Якщо такої можливості немає, можуть бути варіанти з невеликим відхиленням на схід або захід, але при цьому ефективність трохи знижується. Крім цього потрібно враховувати відстань між панелями, якщо їх декілька. Якщо розмістити їх занадто близько, вони можуть затіняти одна одну, особливо коли сонце знаходиться низько. Ще один момент це стан поверхні панелей. З часом на них накопичується пил, бруд або листя, що теж може зменшувати кількість енергії. Тому іноді їх потрібно чистити. Також варто враховувати, що ефективність панелей залежить не тільки від їх розташування, а й від погодних умов. У похмуру погоду вони працюють гірше, ніж у сонячну, але все одно можуть виробляти певну кількість енергії. Тому важливо розуміти, що максимальна ефективність досягається тільки при поєднанні правильного розташування і сприятливих умов.

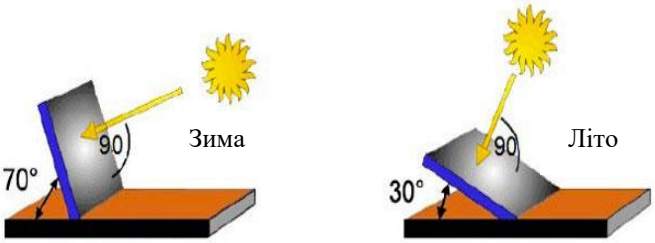


Рисунок 1 – Кут нахилу сонячних панелей в залежності від сезону

Висновки. Отже, якщо правильно обрати місце, уникати тіні, виставити нормальний кут і напрямок, то панелі будуть працювати максимально ефективно у своїх умовах і давати хороший результат протягом довгого часу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Сонячна панель [Електронний ресурс] // Вікіпедія : вільна енциклопедія. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Сонячна_панель (дата звернення: 11.05.2026).

2. Енергоатом : державне підприємство. URL: https://energoatom.com.ua (дата звернення: 11.05.2026).

3. Козлов В. В., Гузей Я. О. Сонячна енергія як джерело електричної енергії. Збірник тез доповідей щорічної науково-практичної конференції (м. Запоріжжя, 19–23 квіт. 2021 р.). Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2021. С. 162–165.

4. Козлов В. В., Набокова О. В. Алгоритм розрахунку сонячної електроустановки для приватного будинку. Збірник тез доповідей щорічної науково-практичної конференції (м. Запоріжжя, 24–28 квіт. 2023 р.). Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2023. С. 207–209.

УДК 621.391

Романіченко Г.М.[1], Кривохлябов М.І.[2]
[1]старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»
[2]студ. гр. М-314 НУ «Запорізька політехніка»

СИСТЕМИ РЕКУПЕРАЦІЇ ЕНЕРГІЇ В ЕЛЕКТРОМОБІЛЯХ: ТОПОЛОГІЯ І СХЕМИ УПРАВЛІННЯ

У конструкціях систем рекуперації енергії ключовими є: вибір топології силової частини, характеристики накопичувача і алгоритми керування.

Топології:

Пряма регенерація через приводний інвертор проста й компактна, двигун переходить у генераторний режим і інвертор подає енергію на шину постійного струму (DC link). Мінус - обмеження узгодження напруги і допустимої потужності при прямому заряді акумулятора.

Двох направлений DC-DC перетворювач: підвищує гнучкість, дозволяє налаштувати напругу і струм під стан заряду (SOC - state of charge) та температуру акумулятора.

Комбіновані схеми з буферами (суперконденсатори): приймають пікові заряди під час інтенсивного гальмування і плавно передають їх у батарею, знижуючи пікові струми та деградацію батарейок.

Силова електроніка. Інвертори та перетворювачі на IGBT (insulated-gate bipolar transistor) або SiC MOSFET; вибір визначає втрати, теплове навантаження й габарити. Потрібні фільтрація завад, захист від перенапруги і перевантажень, ефективний тепловий менеджмент.

Електромагнітна сумісність (EMC) і прокладка Високочастотні перемикання і великі струми створюють перешкоди. Необхідні екранування, правильна прокладка кабелів і LC-фільтри.

Алгоритми керування:

Забезпечення безпеки при гальмуванні; пріоритет механічним гальмам у критичних ситуаціях.

Узгодження з BMS (battery management system) для визначення допустимого зарядного струму.

Адаптація під режим руху і дорожній профіль.

Оптимізація енергоефективності з урахуванням впливу на ресурс батареї.

Інтеграція з ABS (anti-lock braking system) і ESC (electronic stability control) для збереження стійкості.

Забезпечення швидкої реакції і стабільності управління (налаштування ШІМ, модуляції, затримок комутації).

Стан батареї і термоменеджмент При високому SOC або при небезпечних температурах контролери обмежують струм рекуперації. При низьких температурах внутрішній опір зростає; при високих - вмикаються захисні обмеження. BMS оцінює межі в реальному часі і координується з перетворювачами.

Практичні проблеми. Обмежена корисна рекуперація при повному заряді батареї, EMI від силової електроніки, вплив частих пікових циклів на довговічність акумуляторів, необхідність координації з механічними гальмами.

Переваги. Зниження загального енергоспоживання, збільшення пробігу в міському циклі, зменшення зносу гальм і експлуатаційних витрат.

Тренди й рекомендації по проектуванню. Перевага SiC-ключів для зниження втрат і підвищення щільності потужності; розвиток високошвидкісних двонаправлених DC-DC; інтеграція інтелектуальних систем управління енергією; застосування адаптивних алгоритмів і методів машинного навчання для прогнозування поведінки водія та оптимізації рекуперації. Рекомендовано поєднувати буферні накопичувачі для пом'якшення пікових навантажень, впроваджувати реальне часове погодження з BMS і проектувати систему охолодження та EMC-міри на ранніх етапах розробки.

УДК 621.3.027

Набокова О.В.[1], Сидоренко А.Ю.[2]
[1] доц. НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. Е-115 НУ «Запорізька політехніка»

ВИБІР КРАЩОГО ТИПУ ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ ПОБУТОВИХ УСТАНОВОК

Генератори сьогодні досить часто використовуються як запасне джерело електроенергії, особливо в умовах частих відключень світла. Вони дозволяють підтримувати роботу основних приладів у будинку таких як холодиль-

ник, освітлення або навіть деяка техніка. Але щоб генератор дійсно був корисним його потрібно правильно обрати. Якщо зробити неправильний вибір, можна зіткнутися з тим, що потужності не вистачає або навпаки витрачені зайві гроші без особливої потреби.

Існує кілька основних типів генераторів, які використовуються у побуті: бензинові, інверторні та дизельні (рис. 1).



а б в

а – бензиновий; б – інвентарний; в – дизельний.

Рисунок 1 – Різні типи побутових генераторів

Бензинові генератори є найпростішими і доступними. Вони легко запускаються і підходять для короткочасного використання, наприклад під час тимчасових відключень світла. Але вони не дуже добре підходять для тривалої роботи, оскільки швидше зношуються і можуть перегріватися при великих навантаженнях.

Інверторні генератори відрізняються тим, що виробляють більш стабільну електроенергію. Це важливо для сучасної техніки яка чутлива до перепадів напруги, наприклад ноутбуків або телевізорів. Вони також зазвичай працюють тихіше і економніше витрачають паливо, але їх потужність часто обмежена, тому вони не підходять для підключення великої кількості приладів одночасно.

Дизельні генератори більш надійні і витривалі. Вони можуть працювати довше і краще переносять великі навантаження, тому їх часто використовують там, де потрібно стабільне джерело енергії на довгий час. Але при цьому вони зазвичай дорожчі і можуть бути більш шумними.

При виборі генератора потрібно приблизно підрахувати, які прилади будуть використовуватися і скільки енергії вони споживають. Краще брати генератор з невеликим запасом потужності, щоб він не працював на межі своїх можливостей.

Крім потужності, варто звернути увагу на витрати палива, рівень шуму і зручність використання. Наприклад, якщо генератор буде використовуватися біля житлового будинку, занадто гучна модель може створювати дискомфорт. Також важливо враховувати умови зберігання і обслуговування, тому що деякі моделі потребують більше уваги.

Висновки. Отже, для коротких відключень підійде бензиновий генератор, для довготривалої роботи краще обрати дизельний, а для чутливої техніки інверторний. Головне не брати перше що попалося, а трохи розібратися перед покупкою.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Електричний генератор [Електронний ресурс] // Вікіпедія : вільна енциклопедія. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Електричний_генератор (дата звернення: 28.04.2026).

2. Rozetka : інтернет-магазин. URL: https://rozetka.com.ua (дата звернення: 28.04.2026).

3. Козлов В. В., Деридович Д. Р. Який автономний генератор кращий? Проблеми, методи та засоби досліджень світового океану: зб. доп. щорічної наук.-практ. конф. серед студентів, викладачів, науковців, молодих учених і аспірантів (м. Запоріжжя, 24–28 квіт. 2023 р.). Запоріжжя, 2023. С. 243–244.

УДК 620.97

Набокова О.В.[1], Сидоренко А.Ю.[2]
[1] доц. НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. Е-115 НУ «Запорізька політехніка»

ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ В ДОМАШНІХ УМОВАХ

У сучасних умовах питання економії електроенергії стало досить актуальним в Україні, де можуть виникати відключення світла або перепади напруги. Багато людей почали більше звертати увагу на те, скільки електроенергії вони використовують у повсякденному житті. Енергозбереження дозволяє не тільки зменшити витрати, а й зробити використання електрики більш раціональним.

Насправді існує багато простих способів економити електроенергію вдома. Один з найпростіших це заміна звичайних ламп на LED лампи, які

споживають значно менше енергії і довше служать. Також важливо не залишати прилади увімкненими без потреби, наприклад світло в кімнаті або зарядні пристрої в розетці. Навіть у режимі очікування техніка споживає електроенергію, хоч і небагато, але з часом це теж має значення.

Велике значення має і побутова техніка. Сучасні прилади зазвичай більш економні, ніж старі моделі, тому їх використання може допомогти зменшити витрати електроенергії. Наприклад, холодильники або пральні машини нових класів енергоефективності споживають менше електрики при тих самих функціях. Також можна звернути увагу на те, як саме використовується техніка. Наприклад, не варто часто відкривати холодильник без потреби, або вмикати пральну машину напівпорожньою.

Крім цього, важливо враховувати і додаткові способи економії. Наприклад, використання природного освітлення вдень дозволяє рідше вмикати лампи. Утеплення будинку теж може впливати на витрати енергії, особливо якщо використовується електричне опалення. У деяких випадках люди встановлюють сонячні панелі або використовують акумулятори, щоб частково покривати свої потреби в електроенергії. Це вже більш складні рішення, але вони теж відносяться до енергозбереження.

Отже, достатньо змінити деякі звички і звертати увагу на використання електроенергії, і це вже дасть помітний результат як у витратах, так і у зручності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Енергозбереження [Електронний ресурс] // Вікіпедія : вільна енциклопедія. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Енергозбереження
2. ДТЕК : енергетична компанія. URL: https://www.dtek.com

УДК 621.355.9
Волков В.О.[1], Яланський М.С. [2]
[1] доц. НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. Е-312 НУ «Запорізька політехніка»

СУЧАСНІ ЛІТІЙ-ТИТАНАТНІ АКУМУЛЯТОРИ

Літій-титанатні (LTO) акумулятори — це тип акумуляторів (див. рис.1), що відрізняються надзвичайно тривалим терміном служби (до 20–40 тис. циклів), здатністю заряджатися за 6–10 хвилин та ефективною роботою при низьких температурах (до -30...-40 °C). Вони мають номінальну напругу 2,3–2,4 В, високий струм розряду та безпечні в експлуатації.

Основні характеристики (LTO):

- термін служби: 20 000 – 40 000 циклів (зберігають >80% ємності);
- номінальна напруга: 2,3 В – 2,4 В (на елемент);
- максимальна напруга зарядки: 2,8 В;
- мінімальна напруга розряду: 1,5 В – 1,7 В;
- робоча температура: від -30 °С до +60 °С (стабільна робота на морозі);
- заряд: 6–10 хвилин (високі струми, до 10С–15С).
- енергоємність: 30–110 Вт*год/кг (нижча, ніж у Li-ion, але вища, ніж у свинцевих).
- саморозряд: 2–5% на місяць.

Переваги:

- довговічність: термін служби в 10–20 разів вищий, ніж у звичайних Li-ion.
- морозостійкість: не втрачають ємність на морозі.
- безпека: висока термічна стабільність, стійкість до короткого замикання та механічних пошкоджень.

Недоліки:

- ціна: висока вартість за одиницю ємності.
- вага/розмір: низька щільність енергії (більші та важчі за аналогічні LiFePO4 акумулятори).



Рисунок 1 – Літій-титанатні (LTO) акумулятори

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Wang L., Wang Z., Ju Q., Wang Wei. Characteristic Analysis of Lithium Titanate Battery. Energy Procedia. 2017. Vol. 105. P. 4445–4449. URL: https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.942.

УДК 537.8
Козлов В.В.[1], Прокоп'єв Н.О.[2]

[1] доц. НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. Е-315 НУ «Запорізька політехніка»

ЧИ ЗАВЖДИ 10 000 ВОЛЬТІВ НЕБЕЗПЕЧНІ?

Знімаючи вовняний светр, ми чуємо тріск і бачимо іскри. Але ж напруга в цей момент може досягати 10 000 вольтів - як у високовольтній лінії!

Електрика -- явище хоч і звичне, але багато в чому загадкове. Ми точно знаємо: звичайні 220 вольт у розетці - смертельно небезпечні. Погодитеся, імовірність нещасного випадку при використанні електроприладів є завжди. Але як тоді бути з тими розрядами, які ми робимо самі?

Між іншим, сила струму в розрядах статичної електрики також досягає небезпечних для людини значень – більше 100 мА.

Чому ж це не є небезпечним? Чому нічого поганого не відбувається? Насправді секрет криється в трьох факторах: мізерної енергії, «обхідному шляху» струму й швидкості, з якої все відбувається.

Хоча напруга й досягає тисяч вольтів, заряд, який накопичує наше тіло, мізерно малий. З погляду фізики, тіло людини можна зрівняти з конденсатором малюсінької ємності - усього 100-200 пікоФарад. Щоб одержати смертельне ураження, через тіло повинен пройти заряд приблизно в 0,15 кулона.

Для втримання на собі такого заряду людині довелося б «зарядитися» до фантастичної напруги майже в мільярд вольтів. На щастя, у реальності статичний заряд просто стікає в атмосферу, навіть не досягаючи небезпечної концентрації.

Як же наше тіло обманює закони фізики?

Головна причина нашої безпеки - шлях струму. У статичної електрики є ключова особливість: його розряд розтікається винятково по поверхні тіла. Внутрішні органі, м'язи й серце надійне захищені сухим роговим шаром шкіри (епідермісом), який має високий опір.

Болюче відчуття, яке ми почуваємо, - це не проходження струму через тіло, а реакція нервових закінчень на потужний поверхневий імпульс. Цей імпульс наводить (індукує) слабкий струм у підшкірних м'язах, змушуючи їх рефлекторно скорочуватися, але до життєво важливих центрів він просто не доходить.

Але головне тривалість імпульсу.

Струм зі звичайної розетки може текти через тіло людини практично безупинно, поки не спрацює захист.

Статичний же розряд - це спалах. Триває вона незначні частки мікросекунди.

Уявіть собі імпульс в 300 мА, який триває всього 0,00000045 секунди. Він закінчується швидше, чим клітки серцевого м'яза встигають на нього відреагувати. Серце просте не помічає перешкоди такої тривалості.

Висновок. Таким чином людину вбиває не напруга й не сама сила струму окремо, а їх «підступна комбінація» - тривалий вплив на внутрішні органі. У статики ж із цим проблеми: шлях струму вона вибирає неправильний, а час впливу в неї настільки мало, що організм просто не встигає зрозуміти, що відбулося. Тому навіть така висока напруга виявляється неспроможним проти фізики й фізіології нашого тіла.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Кучерук І. М., Горбачук І. Т., Луцик П. П. Загальний курс фізики: навч. посіб.: у 3 т. Т. 2: Електрика і магнетизм / за ред. І. М. Кучерука. 2-ге вид., випр. Київ: Техніка, 2006. 452 с.

2. Сірий Є. І. Загальний фізичний практикум: посіб. Ч. 3: Електрика і магнетизм. Львів: Львів. держ. ун-т, 1966. 216 с.

3. Понеділок Г. В. Фізика електромагнітних явищ. Електро- і магнітостатика: навч. посіб. Львів: Львівська політехніка, 2016. 464 с.

УДК 621.355:614.8

Волков В.О.[1], Перепелка Д.В.[2]
[1] доц. НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. Е-613-2 НУ «Запорізька політехніка»

РИЗИКИ ВИКОРИСТАННЯ ЛІТІЙ-ІОННИХ БАТАРЕЙ

Літій-іонні (Li-ion) батареї безпечні за умови правильного поводження, але несуть серйозні ризики: пожежа, вибух і токсичні викиди внаслідок перегріву, фізичного пошкодження, перезарядження або використання бракованих елементів. Основна небезпека — тепловий розгін (температура >400°C), що вимагає спеціального гасіння.

Основні ризики та їх причини:

- перегрів та пожежа: основний ризик — «тепловий розгін», під час якого батарея швидко нагрівається до екстремальних температур (до 800°C), викликаючи самозаймання та вибухи, які важко загасити;

- механічні пошкодження: удари, падіння, проколи або роздавлювання корпусу можуть призвести до внутрішнього короткого замикання та миттєвого загоряння;

- неправильна зарядка: використання неоригінальних, пошкоджених зарядних пристроїв або перезаряд (напруга > 4,2В - 5В на елемент) викликає здуття, дим та вибух;

- екстремальні температури: заряджання на морозі (нижче 0°C) призводить до пошкодження хімічного складу всередині, а перегрів (на сонці, біля вогню) — до руйнування сепаратора;

- глибокий розряд і старіння: використання старих або повністю розряджених акумуляторів підвищує ризик внутрішнього короткого замикання та витоку електроліту;

- токсичність: під час горіння або руйнування акумулятори виділяють отруйні речовини, зокрема фтороводородну кислоту, небезпечну для органів дихання.

Запобіжні заходи:

1) заборона застосування пошкоджених, роздутих або старих батарей.

2) зарядка тільки сумісними зарядними пристроями при постійному догляді.

3) зберігання акумулятора при частковому розряді (біля 40 – 50 %) в прохолодному місті;

4) використаня якісних оригинальних комплектуючих.

УДК 621.391

Романіченко Г.М.[1], Кривохлябов М.І.[2]
[1]старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»
[2]студ. гр. М-314 НУ «Запорізька політехніка»

ДВОНАПРАВЛЕНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ТА VEHICLE-TO-GRID V2G

Двонаправлений перетворювач забезпечує двосторонній обмін енергією між акумулятором електромобіля і мережею: він заряджає батарею з мережі та перетворює енергію батареї у синусоїдальну напругу для віддачі в мережу. Така функція перетворює автомобіль у мобільний накопичувач, здатний брати участь у балансуванні навантаження, підтримці частоти та резервуванні потужності. Пристрій поєднує силовий інвертор, систему управління енергією (EMS), вимірювальні прилади та інтерфейси зв’язку; разом вони координують потоки енергії, захищають батарею і забезпечують відповідність параметрам якості електроенергії.

Архітектура перетворювача передбачає фазовий інвертор на високочастотних ключах, модулі вимірів і контролю, а також алгоритми швидкого перемикання і захисту. EMS приймає рішення про час і обсяг віддачі на основі стану заряду (State of Change), тарифів, комерційних сигналів і вимог оператора мережі. Комунікація реалізується за допомогою стандартизованих протоколів, що передають інформацію про доступну потужність, ціну та часові вікна для віддачі. Управління пріоритетами власника дає змогу обмежувати віддачу, щоб зберегти запас для поїздок.

Технічні вимоги включають низький рівень гармоній, високий коефіцієнт потужності, стабільність напруги і частоти під час віддачі. Перетворювач має забезпечувати швидкодію захистів, точний моніторинг температури і

струмів, а також механізми обмеження глибини розряду для зниження деградації батареї. Практично це означає реалізацію алгоритмів управління потужністю, синхронізації з мережею, компенсації реактивної складової і адаптивного обмеження струмів при пікових навантаженнях.

Економічна привабливість V2G залежить від тарифної структури, вартості обладнання та впливу циклічної віддачі на ресурс батареї. Власник може отримувати дохід або економити на тарифах, продаючи енергію під час пікових періодів; оператор мережі отримує мобільні резерви для балансування і інтеграції відновлюваних джерел. Бізнес-моделі повинні враховувати вартість деградації акумулятора (глибина розряду, частота циклів, швидкі струми) і прозоро розподіляти доходи між учасниками.

Інфраструктура V2G вимагає двонаправлених зарядних станцій, платформ обміну даними, систем авторизації і розрахунків. Агрегатори можуть об'єднувати невеликі потужності багатьох автомобілів в масштабні ресурси для ринку послуг. Стандартизація роз'ємів, протоколів зв'язку та правил доступу критично важлива для інтероперабельності і масового впровадження.

Приклади та орієнтири. Типові побутові двонаправлені зарядні пристрої мають потужність у діапазоні близько 3,6-22 кВт; комерційні або флотські рішення - 50-100 кВт і більше. Типова корисна ємність батареї легкового електромобіля становить 30-80 кВт·год; при віддачі 10 кВт автомобіль може постачати енергію в мережу 2-8 годин залежно від доступної ємності. Агрегація 1000 автомобілів, кожне здатне віддавати 10 кВт, дає ресурс близько 10 МВт для короткострокового балансування мережі.

Рекомендації для впровадження. Поєднувати технічну надійність перетворювачів із прозорими тарифними механізмами, вводити обмеження глибини розряду для захисту батареї, розвивати платформи авторизації й оплати, а також стимулювати стандартизацію і роль агрегаторів. Паралельно варто вкладати в дослідження алгоритмів управління, що мінімізують деградацію при максимальній економічній вигоді.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Smith J. Power Electronics for Electric Vehicles and Energy Storage. Taylor & Francis, 2023. 304 p.

УДК 621.391
Романіченко Г.М.[1], Кривохлябов М.І.[2]
[1]старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»
[2]студ. гр. М-314 НУ «Запорізька політехніка»

БОРТОВА МЕРЕЖА 48 V ТА ЕКОНОМІЯ ПАЛИВА

Бортова мережа 48 V стає проміжним елементом між традиційною 12 V мережею та високовольтними електричними системами сучасних автомобілів, забезпечуючи більшу потужність для електрифікації допоміжних навантажень без повної гібридизації. Підвищена напруга дозволяє зменшити струми при тій самій потужності, що скорочує втрати в проводці і дає змогу використовувати компактніші та ефективніші перетворювачі й електромотори для систем типу стартер-генератора.

Класичне застосування 48 V – це система *mild-hybrid*, де двонаправлений стартер-генератор (P0- P2 архітектури) підтримує запуск-старт, рекуперацію енергії при уповільненні, допоміжне прискорення та відключення двигуна при холостому ході. Зниження навантаження на ДВЗ в таких режимах призводить до зменшення витрати палива в міському й транзитному циклах, де часті зупинки й старт-стопи створюють найбільший потенціал для економії. Технічні переваги 48 V мережі включають можливість живити електричні компресори кондиціонера, електропідсилювачі рульового управління, турбонаддув з електроприводом, активні підвіски і потужні інвертори без звернення до дорогих високовольтних систем. Менші струми означають тонші кабелі, нижчу вагу проводки та менші теплові втрати; це прямо впливає на загальну ефективність транспортного засобу. Економія палива від впровадження 48 V залежить від архітектури та режимів руху: типові оцінки для mild-hybrid рішень дають зниження витрати палива на 5-15% у змішаному циклі, причому максимальний ефект - у міському циклі. Реальна економія визначається глибиною використання електроасисту, ємністю накопичувача (суперконденсатори чи невеликі Li-ion батареї), алгоритмами управління енергією і характером маршрутів.

Приклади технічних параметрів: потужність 48 V стартер-генератора зазвичай у межах 10-20 кВт для систем середнього класу; пікові імпульси короткочасної допоміжної потужності можуть досягати 20-30 кВт при використанні конденсаторних пакетів. Типова додаткова маса системи 48 V (генератор/інвертор + акумулятор) - 10-30 кг, що компенсується зниженням витрати палива та зменшенням маси традиційної проводки. Інтеграція з двигуном і трансмісією вимагає продуманих алгоритмів управління, що координують асист, рекуперацію і відключення ДВЗ. Грамотне управління дозволяє зменшити режим роботи двигуна в неефективних діапазонах, підтримувати оптимальні оберти при старті та прискоренні, а також зменшити втрати при холостому ході через часті зупинки. Економічна доцільність проекту залежить від вартості компонентів і очікуваної економії палива; при масовому виробництві 48 V компоненти стають відносно недорогими у порівнянні з повноцінними високовольтними гібридними системами. Виробники балансують

між інвестиціями в електроніку і збереженням конкурентної ціни моделі; для сегментів з високим міським пробігом рішення 48 V найчастіше окупаються швидше. Екологічний ефект від впровадження 48 V полягає у зниженні викидів CO_2 пропорційними до зменшенню витрати палива, особливо у міських умовах; додатково - зниження шуму та покращення локальної якості повітря за рахунок меншого часу роботи двигуна на холостому ходу.

Обмеження і ризики: 48 V не замінює повномасштабну електрифікацію - його можливості обмежені енергоємністю накопичувачів і безпековими вимогами. Інтеграція додає складності системі живлення автівки: потребує перетворювачів, стабілізаторів, захистів і ретельної електромагнітної сумісності з існуючими модулями. Технічні виклики включають керування температурою акумуляторів, довговічність електромеханічних елементів при частих циклах асисту, а також потребу в стандартах для виробничого тестування і сервісного обслуговування. Ще одна проблема - коректне калібрування системи для різних кліматичних умов та стилів водіння, щоб уникнути зниження ресурсу або незадовільної динаміки.

Підсумкові рекомендації: впроваджувати 48 V як економічно вигідну проміжну ступінь електрифікації для моделей з високим міським пробігом; комбінувати з ефективними алгоритмами управління енергією і невеликими енергоємними накопичувачами для пікових потреб. Необхідно забезпечити стандартизацію компонентів, підготувати сервісні мережі і передбачити діагностику для контролю стану накопичувачів і електромеханіки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

SAE Technical Papers [Електронний ресурс] // SAE International. URL: https://www.sae.org/publications/technical-papers

УДК 621.865
Деєв С.Г. [1], Олійник І.О. [2]
[1] старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. Е-612 НУ «Запорізька політехніка»

ОБМЕЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РУХУ БПЛА

Успішність виконання польотного завдання БПЛА залежить від якості розв'язання задач по запобіганню втрати БПЛА, яка зводиться до запобігання небезпечним режимам польоту на рівні автопілоту і. передбачає оперативне коригування обмеження параметрів руху БПЛА. Більшість польотів БПЛА виконується в режимі дистанційного пілотування, управління в автоматичному режимі реалізується лише на окремих етапах польоту. Предметом дос-

лідження в роботі є метод побудови САУ з обмеженням граничних параметрів руху.

Запропоновано структуру САУ кутом курсу ЛА з обмеженням нормального перевантаження, особливістю якої є включення до САУ додаткового контуру обмеження за допомогою блоку вибору (БВ), що дозволяє керувати кутом курсу з одночасним обмеженням нормального перевантаження. Запропонована САУ кутом курсу ЛА з обмеженням нормального навантаження дозволяє керувати мінімальним радіусом розвороту літака. Структура запропонованої системи управління складається з 2 контурів - контуру керування основним параметром ЛА Y1 за методом наближення передавальної функції синтезованої системи до бажаної контуру обмеження граничного значення заданого параметра ЛА Y2 з розрахунком параметра обмеження в даних умовах польоту з включенням контуру обмеження в САУ основним параметром ЛА с допомогою БВ (рис.1).

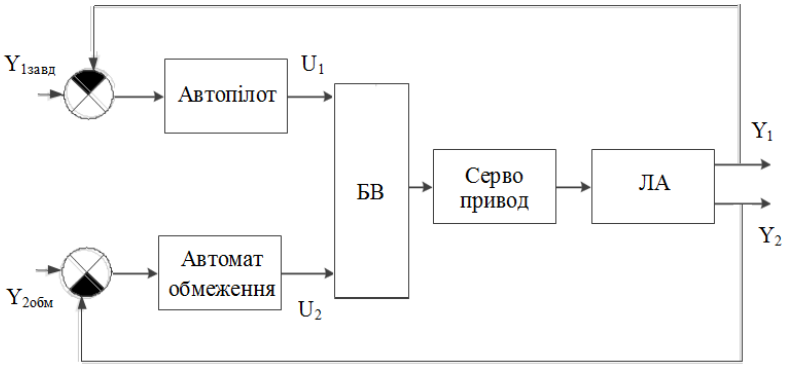


Рисунок 1- Структурна схема САУ ЛА з блоком вибору обмеження.

Висновок. Розроблена структура системи дозволяє забезпечити запобіганню втрати БПЛА за рахунок обмеження режимів польоту.

СЕКЦІЯ «ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ»

УДК 621.316.71
Безверхня Ю.С.
доц. НУ «Запорізька політехніка»

ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ РЕАКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ГНУЧКИХ СТРУМОПРОВОДІВ У МЕТАЛУРГІЙНОМУ ВИРОБНИЦТВІ

Ефективність роботи сучасних електросталеплавильних агрегатів значною мірою визначається електродинамічними характеристиками короткої мережі, де ключову роль відіграють поворотні шини та гнучкі кабелі. Оскільки робочі струми в металургійних цехах сягають десятків кілоампер, реактивний опір системи (X) стає домінуючим фактором, що обмежує передачу корисної потужності в зону дуги. Фізична природа цього опору зумовлена інтенсивними магнітними полями навколо провідників, а його величина залежить від частоти струму f та індуктивності L. Розрахунок індуктивності для основних конфігурацій підвісу базується на визначенні середньогеометричних відстаней між фазами. Для найбільш поширеної площинної розкладки середня індуктивність фази описується формулою:

$$L_{ср} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \left(\ln \frac{D_{ср}}{r} + 0.25 \right) \quad (1)$$

де $D_{ср}$ — середня відстань між осями фаз, r — еквівалентний радіус пакета провідників.

Проте площинне розташування створює значну асиметрію магнітних полів, що призводить до нерівномірного розподілу потужності між електродами — так званого ефекту «дикої» та «мертвої» фаз. Більш досконалою є трикутна конфігурація (розташування у вершинах рівностороннього трикутника), яка забезпечує магнітну симетрію та дозволяє знизити сумарний реактивний опір на 10–15%. Повний опір такої ділянки мережі є комплексною величиною, що формується з урахуванням як активної (R), так і реактивної (X) складових.

У процесі експлуатації розрахунок ускладнюється динамічною зміною геометрії: при нахилі печі для зливу металу відстані між гнучкими кабелями змінюються, що викликає флуктуації реактивного опору. Крім того, необхідно враховувати поверхневий ефект (скін-ефект), який витісняє струм до периферії мідних жил, штучно зменшуючи ефективний переріз провідника. Сучасні методи проектування передбачають використання комп'ютерного

моделювання методом скінченних елементів, що дозволяє врахувати вплив навколишніх металевих конструкцій цеху, які можуть працювати як непрямі магнітопроводи. Оптимізація конфігурації поворотних шин дозволяє не лише збалансувати електричний режим печі, а й суттєво підвищити косинус фі (cosφ), що безпосередньо знижує питомі витрати електроенергії та підвищує продуктивність всього сталеплавильного комплексу.

УДК 621.311.243
Петрик О.А.
доц. НУ «Запорізька політехніка»

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ В УМОВАХ МІСТА (ПОВІДОМЛЕННЯ 2)

У контексті глобального переходу до відновлюваних джерел енергії сонячні електростанції (СЕС) набули широкого поширення як один із найперспективніших засобів генерації екологічно чистої електроенергії. Проте ефективність роботи фотоелектричних модулів значною мірою залежить від кута падіння сонячного випромінювання, що змінюється впродовж доби й року. Саме тому важливим компонентом сучасних СЕС є системи відстеження сонця — сонячні трекери, які забезпечують динамічну орієнтацію панелей у напрямку максимального освітлення. Застосування таких систем дозволяє підвищити виробіток електроенергії в середньому на 20–40% залежно від типу трекера та регіональних умов [6, с. 1833].

Впровадження трекерів у середовищах із дефіцитом вільної площі (дахові СЕС, урбанізовані зони, території агрофотовольтаїки) є одним із головних викликів для розробників і проєктантів. Обмеження простору накладають низку вимог на вибір типу трекера, його габарити, стабільність, стійкість до вітрових навантажень та здатність уникати самозатінення. Зростання інтересу до компактних, мобільних і адаптивних трекерів спричинене не лише тенденцією до децентралізації генерації, а й потребою максимально ефективного використання кожного квадратного метра площі для розміщення фотоелементів [7, с. 5; 10, с. 7

Сонячні трекери поділяються на кілька основних типів залежно від кількості ступенів свободи, способу руху та геометрії встановлення. Найбільш поширеними є одновісні трекери, які змінюють положення фотоелектричних панелей відносно однієї осі. Серед них розрізняють горизонтальні одновісні трекери (HSAT), які обертають модулі навколо горизонтальної осі з півночі на південь, та вертикальні одновісні трекери (VSAT), що здійснюють обертання за східно-західною орієнтацією. Ці системи вважаються оптимальними за співвідношенням ціна–ефективність, особливо в умовах обмеженого прос-

тору, оскільки дозволяють щільніше розташовувати ряди модулів без значного затінення [2, с. 46; 4, с. 24]. Активні трекери використовують електроприводи або гідравлічні системи для зміни положення, тоді як пасивні працюють без зовнішнього джерела енергії — наприклад, за рахунок теплового розширення рідини або зміни тиску, що спрощує конструкцію і зменшує витрати на обслуговування, хоча й знижує точність наведення. Саме трекери в умовах обмеженого простору потребують особливо зваженого підходу до вибору між активними й пасивними системами, адже від цього залежить не лише щільність розміщення модулів, а й стабільність генерації електроенергії.

Існують також азимутальні трекери, які обертаються навколо вертикальної осі, орієнтуючи модуль за напрямком Сонця на горизонті, а також трекери з похилою віссю, які поєднують функціональність одновісних рішень з можливістю нахилу на визначений кут до горизонту. Їх застосування дозволяє досягти компромісу між технічною простотою та енергетичним прибутком [6, с. 1833]. Для систематизації основних конструктивних і функціональних відмінностей між різними типами сонячних трекерів, а також визначення їх доцільності у використанні в умовах обмеженого простору, у таблиці 1 подано узагальнення ключових характеристик. Порівняння охоплює кількість осей обертання, спосіб керування (активний або пасивний), придатність до встановлення на обмежених площах, рівень енергетичної ефективності та типові витрати на обслуговування. Такий підхід дозволяє обґрунтовано підійти до вибору системи відстеження сонця залежно від технічних і просторових умов конкретного проєкту сонячної електростанції.

Сонячні трекери класифікують не лише за кількістю осей, а й за принципом дії — на активні та пасивні системи. Активні сонячні трекери працюють за допомогою електроприводів, моторизованих механізмів і контролерів, що постійно коригують положення фотоелектричних модулів на основі інформації від сенсорів освітленості, або за попередньо запрограмованою траєкторією руху Сонця. Такі системи характеризуються високою точністю стеження та гнучкістю у налаштуваннях, що дозволяє досягти максимального рівня виробітку електроенергії протягом світлового дня [4, с. 25].

Пасивні сонячні трекери, на відміну від активних, не потребують джерел живлення для керування орієнтацією. Їхня робота ґрунтується на фізичних принципах – зазвичай тепловому розширенні рідини, газу або біметалевих елементів, які реагують на різницю в освітленості або температурі з обох боків конструкції. Наприклад, при нагріванні однієї сторони елемент розширюється й нахиляє панель у напрямку більш інтенсивного сонячного випромінювання. Такі системи є менш точними, проте простими в обслуговуванні, дешевшими й придатними до автономної експлуатації у віддалених місцях без доступу до електромереж [1, с. 46].

Таблиця 1 Порівняльна характеристика типів сонячних трекерів

Тип трекера	Кількість осей	Спосіб керування	Придатність до обмеженого простору	Рівень ефективності	Вартість обслуговування
Горизонтальний одновісний (HSAT)	1	Активний/пасивний	Середня	Високий (до +25%)	Помірна
Вертикальний одновісний (VSAT)	1	Активний	Висока	Високий (до +20%)	Низька
Азимутальний	1	Активний	Висока	Середній (до +15%)	Низька
Трекер з похилою віссю	1	Активний/пасивний	Висока	Середній (до +18%)	Помірна
Двохосний	2	Активний	Низька	Максимальний (до +40%)	Висока

У контексті сонячних електростанцій малої площі, що функціонують у щільно забудованих районах або на дахах будівель, обидва типи трекерів мають свої переваги й обмеження. Активні трекери забезпечують вищу генерацію електроенергії, але потребують додаткового енергоспоживання та займають більше простору для повноцінного руху. Натомість пасивні трекери можуть бути корисні у проєктах із суворими просторовими обмеженнями, де ключовим є мінімізація технічної складності та надійність за відсутності обслуговування [7, с. 5; 10, с. 7]. Вибір між цими двома системами має базуватись на ретельному балансі між продуктивністю, доступною площею, умовами експлуатації та довгостроковою економічною ефективністю.

Одним із ключових аргументів на користь впровадження сонячних трекерів є їхній безпосередній вплив на рівень генерації електроенергії. Завдяки динамічному стеженню за Сонцем системи трекінгу здатні значно зменшити втрати, пов’язані з неідеальним кутом падіння сонячного світла на поверхню панелі. Особливо відчутною є перевага трекерів у місцях зі значними добовими та сезонними коливаннями інсоляції. Наприклад, за даними Nagasri D. L. S. та ін., використання двохосьових трекерів дозволяє збільшити виробіток

енергії до 35–40% у порівнянні зі стаціонарними конструкціями [5, с. 6], тоді як HSAT і VSAT дають приріст на рівні 15–25% залежно від розташування об'єкта [6, с. 1835].

У міських умовах та на дахах будівель ефективність трекерів обмежується простором і затіненням від навколишньої інфраструктури. У таких випадках найбільш доцільним є застосування вертикальних одновісних або азимутальних трекерів, які забезпечують оптимізацію руху при збереженні компактності системи. Як зазначають Almadhhachi M. та співавт., у густонаселених середовищах найкращий результат показують інтелектуальні трекери з обмеженим діапазоном повороту, адаптовані до специфіки середовища [7, с. 7].

Висновки. У даному дослідженні проаналізовано теоретичні засади та ключові конструктивно-функціональні параметри застосування сонячних трекерів у сучасних сонячних електростанціях, з особливою увагою до умов обмеженого простору. Встановлено, що впровадження одновісних сонячних трекерів (зокрема горизонтальних HSAT та вертикальних VSAT) є ефективним рішенням для дахових, міських та мобільних СЕС, де важливим є збереження щільності розміщення модулів без втрат продуктивності. У свою чергу, двохосні сонячні трекери демонструють найвищі показники генерації енергії, проте мають суттєві обмеження щодо просторової інтеграції та вартості обслуговування.

Зроблено порівняльний аналіз активних та пасивних сонячних трекерів. Доведено, що активні системи з електроприводами і сенсорним стеженням забезпечують вищу точність позиціонування і більший приріст енергії, тоді як пасивні трекери на основі термогідравлічних рішень є придатними для автономного застосування у віддалених або технічно спрощених установках. Важливо, що азимутальні трекери та трекери з похилою віссю демонструють добру адаптивність до нерівномірного рельєфу та складних архітектурних умов, що робить їх ефективними в агрофотовольтаїці та середовищах із нестандартними обмеженнями площі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Казначеєв А. В., Заячковський А. В., Завацький В. О., Сторчак К. П. Дослідження технології розумного очищення сонячних енергомодулів станції автономного живлення. Зв’язок. 2024. № 3. С. 43–47. https://doi.org/10.31673/2412-9070.2024.034347

2. Kazimirov O., Vlasov K., Onypchenko P., Kostenko I. Орієнтування сонячних панелей системи автономного електроживлення стаціонарного пункту управління. Системи управління, навігації та зв’язку. 2021. № 1(63). С. 45–48. https://doi.org/10.26906/SUNZ.2021.1.045

3. Панченко В. В., Харін Р. О. Моделювання та техніко-економічний розрахунок роботи сонячної електростанції на тяговій підстанції. Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. 2023. № 2. С. 3–13. https://doi.org/10.18664/ikszt.v28i2.283295

4. Бубліков А. В., Іванський І. І. Синтез та дослідження системи оптимального керування положенням сонячної фотоелектричної установки. Електротехнічні та інформаційні системи. 2024. № 105. С. 23–31. https://doi.org/10.32782/EIS/2024-105-5

5. Nagasri D. L. S., Pathipooranam P., bin Mohd Salleh M. F., Marimuthu R. Evaluating the performance and feasibility of integrating thermoelectric generators with solar photovoltaic panels: A case study. Case Studies in Thermal Engineering. 2024. Vol. 64. 105572. https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.105572

6. Manzoor H. U., Aaqib S. M., Manzoor T., Azeem F., Ashraf M. W., Manzoor S. Effect of Optimized Tilt Angle of PV Modules on Solar Irradiance for Residential and Commercial Buildings in Different Cities of Pakistan: Simulation-Based Study. Energy Science & Engineering. 2025. P. 1831-1845. https://doi.org/10.1002/ese3.70004

7. Almadhhachi M., Seres I., Farkas I. Sunflower solar tree vs. flat PV module: A comprehensive analysis of performance, efficiency, and land savings in urban solar integration. Results in Engineering. 2024. Vol. 21. 101742. P. 1-11. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101742

УДК 621.316.71
Лапкіна С.О.
асист. НУ «Запорізька політехніка»

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ ШИХТІВКИ ТА ПРЕСУВАННЯ МАГНІТОПРОВОДІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН ЗМІННОГО СТРУМУ

Сучасний ринок обладнання для збирання магнітних систем електричних машин змінного струму характеризується переходом до повної автоматизації, інтеграції з Індустрією 4.0 та впровадженням технологій точного дозування листів та адгезивного скріплення.

Європейські виробники, такі як DMG MORI, ZEMAN та Euroboor, роблять ставку на концепцію Індустрії 4.0 [7, 10], забезпечуючи найвищу прецизійну точність та повну цифрову інтеграцію процесів. Їхні верстати орієнтовані на випуск складної наукомісткої продукції для аерокосмічної галузі та високопродуктивного верстатобудування, де критично важлива стабільність геометричних параметрів шихтованого пакету. Основний акцент тут зробле-

но на екологічність та використання інноваційних методів скріплення, включаючи технологію "bonding" (склеювання листів лаком).

Китайський сегмент, представлений гігантами на кшталт Suzhou Shuairui [1], Benlong Automation [2] та Jinan Second Machine Tool Group [3], домінує у сфері масового серійного виробництва. Китайські інженери досягли успіху у створенні гнучких автоматизованих ліній, які об'єднують штампування, шихтівку та зварювання осердь у єдиний безперервний цикл. Це обладнання ідеально підходить для випуску двигунів побутової техніки та стандартних промислових приводів, де потрібна висока швидкість переналагодження та мінімальна собівартість одиниці продукції.

Американські компанії, включаючи Radyne Corporation [9], Tempel [6] та Arnold Magnetic Technologies [8], зосереджені на сегменті електротранспорту та спеціалізованих систем із постійними магнітами. Їх технологічні рішення часто включають складні роботизовані осередки з інтегрованим індукційним нагріванням для гарячої посадки осердь на вал [9] і системи лазерного контролю якості в реальному часі. У США приділяють велику увагу кастомізації обладнання під конкретний проект замовника, що дозволяє створювати максимально компактні та енергоефективні магнітні системи.

Українські виробники, такі як «Стандарт-Прилад» [4], ARAMIS та підприємства на базі потужностей НКМЗ, утримують позиції у ніші спеціалізованих верстатів для середнього та важкого електромашинобудування. Місцеві розробки, наприклад, серії ССКС [5] для складання осердь скобами, орієнтовані на надійність та ремонтопридатність в умовах реальної експлуатації. Українські інженери часто впроваджують сучасні системи ЧПУ у перевірені часом механічні платформи, створюючи ефективні рішення для модернізації існуючих виробництв та випуску великих електричних машин. Українські верстати є найбільш доступними щодо вартості володіння та обслуговування, демонструючи високу ефективність у виробництві стандартних асинхронних двигунів та великих генераторів. Українські верстати є найбільш доступними щодо вартості володіння та обслуговування, демонструючи високу ефективність у виробництві стандартних асинхронних двигунів та великих генераторів.

Таким чином, сучасний світовий ринок обладнання для збирання магнітних систем характеризується чіткою регіональною спеціалізацією: європейські та американські виробники лідирують у сегменті прецизійних технологій та адгезивного скріплення (bonding) для високотехнологічних галузей, у той час як китайські компанії домінують у сфері високошвидкісних автоматизованих ліній для масового виробництва важкого електромашинобудування. Загальним вектором розвитку галузі є перехід до концепції Індустрії 4.0, впровадження лазерних та клейових методів фіксації шихтованих пакетів, а також глибока автоматизація контролю геометрії та магнітних властивостей у

реальному часі, що дозволяє суттєво підвищити ККД та експлуатаційні характеристики електричних машин змінного струму.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Brushless Motor Production Line https://www.sr-automate.com/brushless-motor-production-line
2. Benlong Automation Technology Co., Ltd. https://www.benlongkj.com/product/
3. JIER Machine Tool Group https://www.jier-na.com/products.html
4. ТОВ «Стандарт Прибор» https://standart-pribor.com.ua/
5. Система СКСК https://standart-pribor.com.ua/product/sistema-sksk/
6. Tempel https://www.tempel.com/en/capabilities/bonding
7. CWIEME Berlin https://berlin.cwiemeevents.com/page-en/homepage
8. Arnold Magnetic Technologies https://www.arnoldmagnetics.com/
9. Radyne Corporation https://www.radyne.com/
10. VDMA https://www.vdma.eu/en/

УДК 620.9
O. Sytik
student of group E-215

APPLICATION OF SMALL HYDROKINETIC TURBINES IN WATER RESOURCES OF THE ZAPORIZHZHIA REGION

O. Sytik

The relevance of this study is driven by the need to strengthen Ukraine's energy independence in the context of current challenges and the ongoing restoration of its energy infrastructure. For industrial regions such as Zaporizhzhia, the implementation of decentralized energy sources is of particular importance, as they ensure the stability of energy supply and reduce dependence on fossil fuels.

The aim of this work is to substantiate the feasibility of using small hydrokinetic turbines (HKT) in the water resources of the Zaporizhzhia region, taking into account its natural, infrastructural, and environmental conditions.

Small hydrokinetic turbines are devices that convert the kinetic energy of water flow into electricity without the need for dam construction or significant alteration of riverbeds. Their operation requires relatively low flow velocities (approximately 1.5–2 m/s), which are typical for certain sections of the Dnipro River and its tributaries. The key advantages of HKT include environmental safety, minimal impact on aquatic ecosystems, stable power generation, and the possibility of localized application.

The Zaporizhzhia region has significant potential for the implementation of such technologies due to the availability of extensive water resources (the Dnipro River, reservoirs, and small rivers), developed energy infrastructure, and strong scientific and industrial capacity. The use of HKT enables the supply of electricity to local facilities such as farms, riverside settlements, and small infrastructure units.

The economic feasibility of the proposed solutions is supported by moderate capital costs, low operational expenses, and an estimated payback period of 5–7 years. The absence of fuel requirements and the simplicity of maintenance make these systems attractive even without substantial external funding.

The study proposes the implementation of pilot projects, including the installation of an experimental turbine on the Dnipro River, the creation of small turbine clusters on minor rivers, and the development of domestic turbine prototypes in cooperation with universities and research centers.

The implementation of small hydrokinetic turbines will contribute to the development of decentralized energy systems, enhancement of regional energy security, and reduction of environmental impact. However, this topic requires further investigation, including detailed hydrological studies and comprehensive techno-economic assessments for large-scale deployment.

УДК 621.311.243
Петрик О.А.[1], Жуков Р.О. [2]
[1] доц. НУ «Запорізька політехніка»
[2] асп. НУ «Запорізька політехніка»

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ В УМОВАХ МІСТА (ПОВІДОМЛЕННЯ 1)

Підвищення ефективності сонячних електростанцій у сучасних умовах урбанізації, дефіциту вільних земельних ресурсів та зростаючого попиту на децентралізовану генерацію енергії з відновлюваних джерел вимагає впровадження інноваційних рішень, зокрема систем стеження за сонцем. Одним із найперспективніших напрямів є застосування одновісних і двохосних сонячних трекерів, здатних динамічно змінювати орієнтацію фотомодулів відповідно до положення Сонця, тим самим забезпечуючи максимальне поглинання сонячного випромінювання протягом дня. Проте ефективне використання таких систем у щільних забудовах, дахових СЕС або інших просторово обмежених середовищах супроводжується рядом технічних і проєктних обмежень.

Зокрема, горизонтальні одновісні трекери (HSAT) та вертикальні одновісні трекери (VSAT), які демонструють високу продуктивність на відкритих

площах, не завжди придатні для інсталяції на дахах чи між будівельними конструкціями. Азимутальні трекери та трекери з похилою віссю частково вирішують це завдання, проте потребують додаткових розрахунків щодо вітрового навантаження, стабільності кріплень і уникнення затінення. Окрему складність становить вибір між активними сонячними трекерами, які забезпечують високу точність позиціонування завдяки електромеханічним приводам, та пасивними сонячними трекерами, що є менш енерговитратними, але поступаються у швидкості реакції й точності налаштування.

На сьогодні відсутнє єдине уніфіковане інженерне рішення щодо оптимального типу трекера для обмежених просторів, яке б враховувало співвідношення між продуктивністю, вартістю, надійністю та можливістю інтеграції з існуючими сонячними електростанціями. Також недостатньо досліджено вплив різних конфігурацій систем відстеження сонця на загальну продуктивність установок у нестандартних просторових умовах. У цьому контексті актуальним є аналіз і систематизація сучасних технологій стеження за сонцем, що дозволяють максимально ефективно використовувати обмежені площі при впровадженні СЕС.

Таким чином, постає проблема вибору та адаптації сонячних трекерів — HSAT, VSAT, азимутальних, з похилою віссю — до умов компактного розміщення, з урахуванням технічних параметрів, економічної доцільності, потенціалу підвищення ефективності та впливу на продуктивність систем. Розв'язання цієї проблеми відкриває нові можливості для оптимізації проєктів у галузі електроенергетики, зокрема у межах реалізації локальних або комерційних сонячних електростанцій нового покоління.

Проблематика підвищення ефективності сонячних електростанцій за допомогою систем стеження за сонцем дедалі частіше опиняється у фокусі наукової спільноти, зокрема у контексті обмеженого простору для встановлення фотомодулів. У численних дослідженнях розглядаються різні типи трекерів — одновісні сонячні трекери, двохосні сонячні трекери, а також специфічні їх модифікації, серед яких горизонтальні одновісні трекери (HSAT), вертикальні одновісні трекери (VSAT), азимутальні трекери та трекери з похилою віссю.

У роботі А. В. Казначеєва та ін. представлено аналіз автоматизованих технологій очищення енергомодулів для сонячних станцій автономного живлення. Хоча акцент зроблено на експлуатаційній ефективності, автори наголошують і на важливості точного орієнтування панелей для запобігання втратам енергії [1, с. 45]. О. Казіміров та ін. у своєму дослідженні орієнтування сонячних панелей у системах автономного електроживлення наводять приклади застосування одновісних систем, що є ефективним рішенням у системах із обмеженим доступним простором [2, с. 46].

Таким чином, проведений аналіз публікацій свідчить про стійке зростання наукового інтересу до теми вдосконалення систем стеження за сонцем у контексті підвищення ефективності, зниження витрат та розширення можливостей їх використання в умовах обмеженого простору. Разом із тим, подальших досліджень потребують питання точного порівняння ефективності різних типів трекерів (HSAT, VSAT, азимутальних, похилих) за умов реальних просторових обмежень, а також вдосконалення алгоритмів активного та пасивного стеження для їх масштабованої інтеграції з сучасними сонячними електростанціями.

Метою статті є дослідження аспектів використання сонячних трекерів для підвищення ефективності сонячних електростанцій, з акцентом на аналізі доцільності впровадження одновісних і двохосних систем (зокрема HSAT, VSAT, азимутальних трекерів і трекерів з похилою віссю) в умовах обмеженого простору. Особливу увагу приділено порівнянню активних і пасивних трекерів, їх впливу на продуктивність фотоелектричних модулів, а також можливостям інтеграції систем відстеження сонця в сучасні архітектури сонячних електростанцій.

Таким чином, у рамках даного дослідження ставились такі завдання: здійснити класифікацію сонячних трекерів за кількістю осей обертання та принципом дії; проаналізувати особливості застосування одновісних (HSAT, VSAT) і двохосних (азимутальних, похилих) систем з урахуванням просторових і кліматичних обмежень; порівняти ефективність активних і пасивних трекерів у контексті впливу на генерацію електроенергії; дослідити доцільність використання трекерів в умовах обмеженого простору, включаючи дахові або фасадні установки; а також надати техніко-економічні рекомендації щодо впровадження найбільш ефективних рішень для малих і середніх сонячних електростанцій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Казначеєв А. В., Заячковський А. В., Завацький В. О., Сторчак К. П. Дослідження технології розумного очищення сонячних енергомодулів станції автономного живлення. Зв'язок. 2024. № 3. С. 43–47. https://doi.org/10.31673/2412-9070.2024.034347

2. Kazimirov O., Vlasov K., Onypchenko P., Kostenko I. Орієнтування сонячних панелей системи автономного електроживлення стаціонарного пункту управління. Системи управління, навігації та зв'язку. 2021. № 1(63). С. 45–48. https://doi.org/10.26906/SUNZ.2021.1.045

3. Панченко В. В., Харін Р. О. Моделювання та техніко-економічний розрахунок роботи сонячної електростанції на тяговій підстанції. Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. 2023. № 2. С. 3–13. https://doi.org/10.18664/ikszt.v28i2.283295

УДК 621.311.243
Петрик О.А.[1], Жуков Р.О. [2]
[1] доц. НУ «Запорізька політехніка»
[2] асп. НУ «Запорізька політехніка»

АНАЛІЗ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКУ ТИПУ ТРЕКЕРА ТА ПАРАМЕТРІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ГЕНЕРАЦІЮ ЕНЕРГІЇ

У сучасних умовах розвитку відновлюваної енергетики особливу увагу приділяють підвищенню ефективності сонячних електростанцій. Одним із найбільш ефективних способів збільшення виробітку електроенергії є застосування систем відстеження Сонця (трекерів).

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю оптимізації роботи фотоелектричних установок в умовах змінної інсоляції та кліматичних факторів. Метою роботи є аналіз взаємозв'язку типу трекера та параметрів, що впливають на генерацію електроенергії.

Підвищення ефективності сонячних електростанцій у сучасних умовах урбанізації, дефіциту вільних земельних ресурсів та зростаючого попиту на децентралізовану генерацію енергії з відновлюваних джерел вимагає впровадження інноваційних рішень, зокрема систем стеження за сонцем. Одним із найперспективніших напрямів є застосування одновісних і двохосних сонячних трекерів, здатних динамічно змінювати орієнтацію фотомодулів відповідно до положення Сонця, тим самим забезпечуючи максимальне поглинання сонячного випромінювання протягом дня. Проте ефективне використання таких систем у щільних забудовах, дахових СЕС або інших просторово обмежених середовищах супроводжується рядом технічних і проєктних обмежень.

У контексті сонячних електростанцій малої площі, що функціонують у щільно забудованих районах або на дахах будівель, обидва типи трекерів мають свої переваги й обмеження. Активні трекери забезпечують вищу генерацію електроенергії, але потребують додаткового енергоспоживання та займають більше простору для повноцінного руху. Натомість пасивні трекери можуть бути корисні у проєктах із суворими просторовими обмеженнями, де ключовим є мінімізація технічної складності та надійність за відсутності обслуговування [1 с. 5; 2, с. 7]. Вибір між цими двома системами має базуватись на ретельному балансі між продуктивністю, доступною площею, умовами експлуатації та довгостроковою економічною ефективністю.

Одним із ключових аргументів на користь впровадження сонячних трекерів є їхній безпосередній вплив на рівень генерації електроенергії. Завдяки динамічному стеженню за Сонцем системи трекінгу здатні значно зменшити втрати, пов'язані з неідеальним кутом падіння сонячного світла на поверхню панелі. Особливо відчутною є перевага трекерів у місцях зі значними добо-

вими та сезонними коливаннями інсоляції. Наприклад, за даними Nagasri D. L. S. та ін., використання двохосьових трекерів дозволяє збільшити виробіток енергії до 35–40% у порівнянні зі стаціонарними конструкціями [5, с. 6], тоді як HSAT і VSAT дають приріст на рівні 15–25% залежно від розташування об'єкта [6, с. 1835].



Рисунок 1 - Взаємозв’язок типу трекера, орієнтації та рівня генерації енергії

У міських умовах та на дахах будівель ефективність трекерів обмежується простором і затіненням від навколишньої інфраструктури. У таких випадках найбільш доцільним є застосування вертикальних одновісних або азимутальних трекерів, які забезпечують оптимізацію руху при збереженні компактності системи. Як зазначають Almadhhachi M. та співавт., у густонаселених середовищах найкращий результат показують інтелектуальні трекери з обмеженим діапазоном повороту, адаптовані до специфіки середовища [7, с. 7].

Успішна інтеграція сонячних трекерів у сучасні архітектури сонячних електростанцій (СЕС) передбачає врахування як технічних можливостей обраної системи, так і обмежень навколишнього простору. Залежно від масштабів СЕС, доступної площі, орієнтації ділянки та кліматичних умов, обираються відповідні трекери, які можуть ефективно взаємодіяти з системами моніторингу, акумулювання енергії та керування потужністю. Наприклад, у малих і середніх СЕС на дахах промислових або житлових будівель пріоритет надається вертикальним одновісним трекерам або азимутальним системам, що можуть бути встановлені без порушення статичної рівноваги об’єкта [6, с. 1834]. У великих наземних установках частіше використовують горизо-

нтальні або двохосні трекери, особливо коли мова йде про генерацію в мегаватному діапазоні [5, с. 6].

Ключовим елементом функціонування трекерів у сучасних СЕС є алгоритми автоматичного стеження за Сонцем, які ґрунтуються на геолокаційних параметрах, астрономічних таблицях або даних сенсорів освітлення. Системи керування в активних трекерах здатні не лише визначати оптимальне положення панелі протягом дня, а й адаптуватися до хмарності, затінення або змін погодних умов. Автоматизовані модулі керування, інтегровані з контролерами заряду, значно підвищують стабільність роботи автономних електроживильних комплексів [2, с. 47].

У результаті дослідження встановлено, що застосування сонячних трекерів є ефективним способом підвищення генерації електроенергії фотоелектричними системами. Найбільш оптимальним рішенням у більшості випадків є використання одновісних трекерів, які забезпечують баланс між ефективністю та вартістю.

Двовісні трекери доцільно застосовувати в умовах високої інсоляції або обмеженої площі встановлення. Вибір типу трекера повинен базуватися на комплексному техніко-економічному аналізі.

Інтеграція трекерів у СЕС в умовах обмеженого простору стикається з низкою практичних викликів. По-перше, це — необхідність забезпечення вільної зони обертання, яка в умовах щільної міської забудови або нерівного рельєфу може бути критично обмеженою. По-друге, особливу увагу потрібно приділяти питанням вітростійкості, адже рухомі конструкції трекерів є більш вразливими до вітрових навантажень, особливо на висоті. По-третє, ускладнюється захист від затінення між рядами, що вимагає точного проєктування інтервалів та висоти розміщення. В урбанізованому середовищі навіть незначні похибки в конфігурації можуть звести нанівець переваги трекінгу. Тому оптимальна інтеграція трекерів потребує застосування цифрового моделювання, інсоляційного аналізу та погодинної симуляції генерації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Almadhhachi M., Seres I., Farkas I. Sunflower solar tree vs. flat PV module: A comprehensive analysis of performance, efficiency, and land savings in urban solar integration. Results in Engineering. 2024. Vol. 21. 101742. P. 1-11. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101742

2. Zhang X., Li W., Wang Y., Wang Z., Sun H., Tao K., Ye T., та ін. Design and Application of Self-Power-Tracking Modular Solar Device. SSRN. 2025. P. 1-23. http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5164912

3. Kazimirov O., Vlasov K., Onypchenko P., Kostenko I. Орієнтування сонячних панелей системи автономного електроживлення стаціонарного пунк-

ту управління. Системи управління, навігації та зв'язку. 2021. № 1(63). С. 45–48. https://doi.org/10.26906/SUNZ.2021.1.045

4. Панченко В. В., Харін Р. О. Моделювання та техніко-економічний розрахунок роботи сонячної електростанції на тяговій підстанції. Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. 2023. № 2. С. 3–13. https://doi.org/10.18664/ikszt.v28i2.283295

5. Бубліков А. В., Іванський І. І. Синтез та дослідження системи оптимального керування положенням сонячної фотоелектричної установки. Електротехнічні та інформаційні системи. 2024. № 105. С. 23–31. https://doi.org/10.32782/EIS/2024-105-5

6. Nagasri D. L. S., Pathipooranam P., bin Mohd Salleh M. F., Marimuthu R. Evaluating the performance and feasibility of integrating thermoelectric generators with solar photovoltaic panels: A case study. Case Studies in Thermal Engineering. 2024. Vol. 64. 105572. https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.105572

7. Manzoor H. U., Aaqib S. M., Manzoor T., Azeem F., Ashraf M. W., Manzoor S. Effect of Optimized Tilt Angle of PV Modules on Solar Irradiance for Residential and Commercial Buildings in Different Cities of Pakistan: Simulation-Based Study. Energy Science & Engineering. 2025. P. 1831-1845. https://doi.org/10.1002/ese3.70004

УДК 621.316.71

Лапкіна С.О.[1], Ляшова К.Г. [2], Галета І.О.[3]
[1] асист. НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. Е-214 НУ «Запорізька політехніка»
[3] студ. гр. Е-272 НУ «Запорізька політехніка»

ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОСТОРОВОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ СТАЦІОНАРНИХ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ГЕНЕРАЦІЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Концептуальна мета оптимізації кутових параметрів та експозиції фотоелектричних модулів полягає у максимізації сумарної сонячної інсоляції (річної, сезонної або добової), що детермінує енергетичний вихід системи. Ключовим механізмом досягнення граничних показників є мінімізація кута падіння сонячного випромінювання відносно нормалі до робочої поверхні панелі. Враховуючи динамічний характер положення Сонця, що визначається варіативністю висоти світила та азимутального кута залежно від часових інтервалів (і географічних координат, процес налаштування орієнтації потребує комплексного врахування астрономічних та топографічних чинників.

Для забезпечення прецизійної точності розрахунків доцільно визначати кут сонячного схилення δ для довільного часового інтервалу річного циклу.

Параметр схилення детермінується як кутова величина між вектором сонячного випромінювання та площиною земного екватора; його значення варіюється в межах від +23,45° до -23,45° внаслідок річної динаміки руху Землі. Загальноприйнятим інженерним стандартом для аналітичного обчислення даного показника є формула Купера

$$\delta=23,45\cdot\sin(360/365\cdot(284+N)) \quad (1)$$

де N - день року від 1 (для 01.01) до 365 (для 31.12).

У сонячний опівдні оптимальний кут нахилу дорівнює:

$$\theta=|Ш-\delta|. \quad (2)$$

Розподіл кута нахилу фотоелектричних перетворювачів для міста Запоріжжя по днях календарного року наведено на рисунку 1.

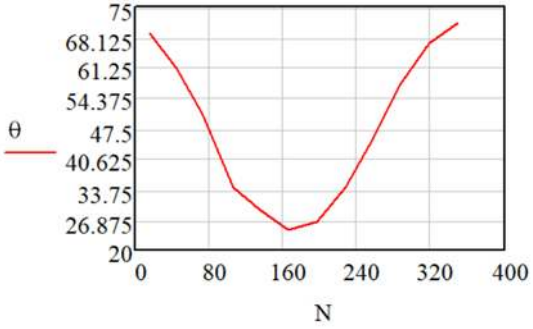


Рисунок 1 – Розподіл кута нахилу фотоелектричних перетворювачів

Графічна залежність, наведена на рисунку 1, демонструє виражену сезонну циклічність оптимального кута нахилу фотоелектричних перетворювачів, що корелює з річним ходом висоти Сонця над горизонтом для широти м. Запоріжжя.

Аналіз розподілу дозволяє виділити наступні закономірності. У зимовий період спостерігається зростання оптимального кута до пікових значень (близько 65-70 °), що зумовлено низьким стоянням Сонця та необхідністю мінімізації кута падіння променів відносно нормалі до поверхні модуля. У літній період: графік фіксує мінімальні значення кута нахилу (близько 25-30 °), оскільки Сонце досягає своєї максимальної висоти, а пряма радіація падає під кутами, близькими до зенітних. У перехідні періоди зміна значень відбувається плавно, відображаючи безперервну варіацію сонячного схилення від дня весняного до дня осіннього рівнодення.

Таким чином, представлений розподіл підтверджує, що для стаціонарних систем із фіксованим нахилом у даному регіоні найбільш енергоефективним є компромісний середньорічний кут у діапазоні 40-45 °, тоді як для систем із можливістю сезонного регулювання доцільною є адаптація положення панелей відповідно до наведеної кривої.

УДК 621.316.71
Лапкіна С.О.[1], Карпенко Р.Д. [2] , Чевичелов Д.С.[3]
[1] асист. НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. Е-213 НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. Е-214сп НУ «Запорізька політехніка»

ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ДЛЯ ОЦІНКИ ІНДУКТИВНОСТІ РОЗСІЮВАННЯ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Метою роботи є розробка та реалізація комп'ютерної моделі силового трансформатора в середовищі чисельного аналізу для прецизійного визначення індуктивності розсіювання з урахуванням реальної геометрії магнітної системи та обмоток.

У якості об’єкту моделювання виступає трифазний силовий масляний трансформатор типу ТДН-16000/110. Були визначені електричні і геометричні параметри трансформатора, розраховані обмоткові дані.

Розрахунок індуктивності розсіювання зазвичай виконується одним із таких основних способів: аналітичний метод, практичний метод і метод на основі чисельно-польового моделювання. Практичний метод передбачає випробування короткого замикання на реальному трансформаторі і не розглядається в цій роботі. Аналітичний метод за основу бере формулу Роговського і базується на припущенні, що магнітний потік розсіювання проходить паралельно вісі обмоток. За аналітичним методом індуктивність розсіяння проводиться за формулою (1). В формулі (1) зазначено: w - кількість витків обмотки, l_ср - середня довжина витка, H_p - висота обмотки, a_p - зведена товщина каналу розсіяння, k_p - коефіцієнт Роговського, який враховує викривлення поля на краях обмоток.

$$L_\sigma = \mu_0 \cdot \frac{w^2 \cdot l_{\text{ср}}}{H_p} \cdot a_p \cdot k_p \qquad (1)$$

Метод розрахунку індуктивності на основі чисельно-польового моделювання використовує розрахунок через енергію магнітного поля, накопиче-

ного у просторі за формулою (2). Позитивною особливістю даного методу є урахування реальних вигинів ліній поля і насичення сталі.

$$L_\sigma = 2 \cdot \frac{W}{I^2}. \tag{2}$$

За результатами попереднього розрахунку у програмному засобі FEMM розрахунків була побудована модель, зображена на рис. 1.

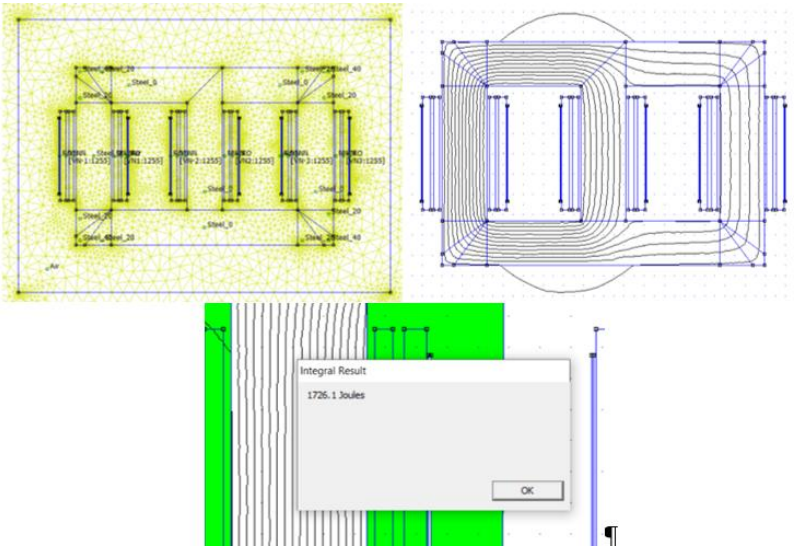


Рисунок 1 – Двовимірна модель силового трансформатора і результати моделювання

Результати проведених розрахунків зведемо до табл. 1.

Таблиця 1 – Результати розрахунку індуктивності розсіювання

Параметр L_σ	Обмотка	Значення
за аналітичним методом	ВН	252 мГн
	НН	6.93 мГн
за чисельно-польовим моделюванням	ВН	267.32 мГн
	НН	7.34 мГн

Відмінності в розрахунках склали менше ніж 6%. Таким чином, можна зробити висновки, що чисельно-польове моделювання дозволяє отримати більш точну оцінку індуктивності розсіювання, оскільки воно враховує:

- складну конфігурацію магнітного поля на краях обмоток (крайові ефекти).
- вплив матеріалу магнітопроводу, який частково втягує в себе потік розсіювання.
- реальне розташування обмоток у вікні трансформатора.

УДК 621.316.71
Лапкіна С.О.[1], Ільченко В.Р.[2], Лєсбаєв Т.Ш.[3]
[1] асист. НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. Е-214 НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. Е-213 НУ «Запорізька політехніка»

ВЕКТОР РОЗВИТКУ ТЕХНОЛОГІЙ ДВИГУНІВ НА ПОСТІЙНИХ МАГНІТАХ

Метою даного дослідження є обґрунтування шляхів технологічної незалежності України у сегменті виробництва двигунів на постійних магнітах через перехід до використання доступних матеріальних альтернатив та розвиток власної сировинної бази. Використання двигунів на постійних магнітах в Україні набуло стратегічного значення, охоплюючи широкий спектр критичних галузей — від оборонного сектора, де вони є незамінною основою для силових установок безпілотних літальних апаратів та морських дронів до агропромислового комплексу та сфери мікромобільності. Завдяки своїй високій енергоефективності та компактності, такі двигуни масово впроваджуються в системи міського електротранспорту, сучасне насосне обладнання комунального господарства та високоточні верстати, забезпечуючи значну економію електроенергії та точність керування. Таким чином, технологія двигунів із постійними магнітами сьогодні виступає ключовим інструментом технологічної модернізації країни, дозволяючи ефективно вирішувати завдання щодо забезпечення національної безпеки, підвищення конкурентоспроможності громадянської інфраструктури в умовах дефіциту енергоресурсів.

Для українського промислового сектора вектор матеріалознавства у виробництві двигунів на постійних магнітах спрямований на подолання критичної залежності від імпорту рідкісноземельних металів. У сучасних реаліях це передбачає перехід до створення повного циклу виробництва: від освоєння власних родовищ літію та рідкісноземельних руд до впровадження технологій «замкненого циклу» та розробки інноваційних магнітів на основі доступних феритів або нітриду заліза. Така стратегія імпортозаміщення, підкріплена оптимізацією геометрії роторів для збереження високої потужності, дозволить вітчизняним підприємствам від оборонного комплексу до виробників

побутової техніки істотно знизити собівартість продукції та забезпечити технологічну стійкість незалежно від коливань світових цін на сировину.

Вектор оптимізації геометрії та топології двигунів в Україні орієнтований на перехід до архітектури з аксіальним магнітним потоком, що дозволяє створювати надкомпактні та легкі дискові електроприводи з високою питомою потужністю. Для вітчизняного машинобудування, особливо в сегментах безпілотної авіації та легкого електротранспорту, впровадження таких рішень означає можливість інтеграції моторів безпосередньо в колеса або вузли кріплення гвинтів без важких редукторів. Використання адитивних технологій та інноваційних магнітопроводів у виробництві цих двигунів забезпечує гнучкість проектування під специфічні потреби ВПК та цивільного сектора, підвищуючи загальну енергоефективність систем при суттєвому зниженні їх ваги та габаритів.

Вектор технологічної інтеграції в Україні передбачає перехід до створення інтелектуальних мехатронних модулів, які поєднують двигун на постійних магнітах та силову електроніку в єдиному компактному корпусі. Для українських розробників цей напрям відкриває шлях до використання високочастотних інверторів на базі карбіду кремнію, що є критично важливим для підвищення енергоефективності систем автономного живлення та зниження теплових втрат в умовах обмежених ресурсів. Така консолідація компонентів дозволяє не лише зменшити габарити приводів для потреб сучасної робототехніки та автоматизованих виробничих ліній, а й значно спростити сервісну логістику, забезпечуючи вітчизняним підприємствам конкурентну перевагу за рахунок створення готових до встановлення інтелектуальних вузлів із цифровим керуванням.

Вектор сталого розвитку в Україні фокусується на впровадженні принципів економіки замкненого циклу, спрямованих на екологічно безпечну утилізацію та повторне використання компонентів двигунів на постійних магнітах. В умовах необхідності відновлення промислового потенціалу країни пріоритетним стає створення національних потужностей з глибокої переробки промислового та електронного брухту для вилучення цінних елементів, що мінімізує екологічний слід та знижує навантаження на навколишнє середовище. Реалізація таких програм у поєднанні з переходом на енергозберігаючі стандарти експлуатації двигунів на постійних магнітах у комунальному та індустріальному секторах дозволяє Україні інтегруватися до європейського «зеленого» сектору, забезпечуючи довгострокову ресурсну безпеку та відповідність міжнародним екологічним нормам.

Таким чином, розвиток технологій двигунів на постійних магнітах в Україні є стратегічним переходом від простої експлуатації імпортних рішень до створення високотехнологічної самодостатньої галузі. Успіх цього вектора базується на синергії глибокої модернізації проектування та формуванні вну-

трішньої ресурсної безпеки через освоєння власних родовищ та впровадження технологій «замкненого циклу». Зрештою, реалізація цих пріоритетів дозволить Україні не лише забезпечити потреби оборонного та енергетичного секторів ефективними та компактними приводами, а й зайняти конкурентну нішу на європейському ринку в рамках «зеленого» переходу, перетворивши сировинний потенціал на готову продукцію з високою доданою вартістю.

УДК 621.316.71
Лапкіна С.О. [1] , Крашевський Р.Є. [2] , Воскобойник Н.О. [2]
[1] асист. НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. Е-214сп НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. Е-214сп НУ «Запорізька політехніка»

АНАЛІЗ ПОСТАЧАЛЬНИКІВ ХОЛОДНОКАТАНОЇ АНІЗОТРОПНОЇ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОЇ СТАЛІ ДЛЯ РЕГІОНУ СХІДНОЇ ЄВРОПИ

Ринок електротехнічних сталей Східної Європи у 2024–2025 роках характеризується відновленням попиту на зернисту (трансформаторну) сталь (GOES), викликаним модернізацією енергетичних мереж та розвитком відновлюваної енергетики [1].

Основні виробничі потужності зосереджені в Румунії, Польщі та Словаччині, тоді як Україна є важливим споживачем та регіональним хабом для сервісних послуг.

У досліджуваній вібірці підприємств [1-6] спостерігається чітка диференціація по глибині переробки та типу матеріалів, що випускаються. ArcelorMittal [4] виступає технологічним детермінантом регіону, маючи повний цикл виробництва високотехнологічних анізотропних (GOES) та ізотропних (NGO) сталей з акцентом на марки з екстремально низькими питомими магнітними втратами (серія iMagne). На противагу цьому, Erdemir Romania [3] спеціалізується переважно на сегменті NGO-сталей середньої та високої щільності магнітного потоку, орієнтуючись на масовий ринок електромашинобудування. ES Steel s.r.o. [5] та ТОВ «Укрелектросталь» [6] являють собою модель високотехнологічних сервісних хабів: словацьке підприємство фокусується на прецизійній обробці та виробництві готових компонентів магнітопроводів (Step-Lap), тоді як український оператор виконує роль критичної інфраструктурної ланки, адаптуючи імпортний підкат під стандарти ДСТУ та потреби локальних машин.

Конкурентні переваги ArcelorMittal [4] базуються на ефекті масштабу та інтеграції у глобальні ланцюжки створення вартості, що дозволяє компанії домінувати у проектах з будівництва магістральних електромереж та інфраструктури для поновлюваної енергетики. Erdemir Romania [3] успішно кон-

курує у ніші вимірювальних трансформаторів та побутової електротехніки за рахунок оптимізації логістичних витрат у Чорноморському регіоні та гнучкої цінової політики порівняно із західноєвропейськими аналогами. ES Steel s.r.o. [5] демонструє високу конкурентоспроможність у сегменті індивідуальних інженерних рішень, виграючи за рахунок скорочення термінів постачання та високої якості геометричних допусків при різанні. ТОВ «Укрелектросталь» [6] утримує позиції на ринку України завдяки глибокій експертизі у локальних технічних регламентах та здатності забезпечувати компенсаторну функцію в умовах нестабільності зовнішніх поставок.

Споживчий ландшафт компаній відбиває ієрархію складності електротехнічної продукції. Продукція польських потужностей ArcelorMittal [4] інтегрована у високотехнологічні виробництва Hitachi Energy та Siemens Energy, орієнтовані на глобальний експорт силового обладнання. Румунський прокат [3] знаходить застосування у продукції середнього класу точності, таких як Electroputere. Діяльність ES Steel [5] переважно пов'язана з центральноєвропейським кластером виробництва тягових двигунів і розподільчих трансформаторів. Український сегмент обслуговує традиційні кластери важкого електромашинобудування (у м. Запоріжжя і м. Харків), забезпечуючи матеріалами виробників розподільчих пристроїв та спеціалізованих вимірювальних приладів, що підтверджує стратегічну значущість підприємства для енергетичної безпеки країни.

Таким чином, ринок електротехнічних сталей регіону Східної Європи є збалансованою екосистемою, де ArcelorMittal забезпечує технологічний фронтир, Erdemir Romania — сировинну базу середнього переділу, а ES Steel та «Укрелектросталь» — необхідну адаптивність та сервісну підтримку для кінцевих виробників трансформаторного обладнання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1.Аналіз тенденцій та критерії купівлі в різних сегментах кінцевого використання. URL: https://www.futuremarketinsights.com/ru/reports/electrical-steel-market/ (дата звернення 10.04.2026)

2.ArcelorMittal Europe у 2024 році збільшив виплавку сталі на 8,3% р./р. URL: https://dia.dp.gov.ua/arcelormittal-europe-u-2024-roci-zbilshiv-viplavku-stali-na-83-r-r/ (дата звернення 14.04.2026)

3.Erdemir. Home page. URL: https://www.erdemir.ro/en/home-page/ (дата звернення 12.04.2026)

4.ArcelorMittal Europe. Home page. URL: https://europe.arcelormittal.com/home (дата звернення 14.04.2026)

5.Es steel s.r.o. Home page. URL: https://es-steel.eu/ua/ (дата звернення 14.04.2026)

6.Металургійні підприємства України 2025: ціни на сталь, металопрокат та перспективи галузі. URL: https://ukrsteelinvest.com.ua/ru/metalloprokat-i-perspektivu-razvitiya/?srsltid=AfmBOoqbOzy_ts4PXvPQ9Me4IwYDGhSKKTXLkQIB5uFbVvc81iJryWHY/ (дата звернення 12.04.2026)

УДК 621.316
Шамрай А. Є.
асп. НУ «Запорізька політехніка»

ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ СХЕМИ ПРИМУСОВОГО ДУГОГАСІННЯ ВИМИКАЧА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Міські тягові підстанції та підстанції метрополітену працюють в умовах високої динаміки навантаження, значних струмів короткого замикання та постійних змін режимів роботи, зумовлених нерівномірністю руху рухомого складу. За таких умов особливе значення набуває надійність і швидкодія апаратів комутації та захисту, зокрема вимикачів постійного струму, що застосовуються в тягових електричних мережах з номінальною напругою 600, 825 та 1650 В. Своєчасне та надійне відключення аварійних режимів є необхідною умовою забезпечення безпечної та безперебійної роботи систем електричного транспорту.

Вимикачі постійного струму виконують функцію локалізації аварійних режимів, забезпечуючи швидке відключення пошкодженої ділянки та збереження працездатності решти тягової мережі. Особливістю вимикання постійного струму є відсутність природного переходу струму через нуль, що значно ускладнює процес гасіння електричної дуги. У традиційних механічних вимикачах гасіння дуги здійснюється за рахунок збільшення дугового проміжку та використання дугогасильних камер, однак такі рішення часто характеризуються обмеженою швидкодією, значним зносом контактів та підвищеними енергетичними навантаженнями на комутаційні елементи.

Одним із перспективних напрямів підвищення ефективності вимикання струмів постійного струму є застосування гібридних вимикачів [1], у яких поєднуються переваги механічної комутації та твердотільних ключів. Зазвичай такі вимикачі складаються з високошвидкісного механічного вимикача, метал-оксидного варистора та комутаційного кола. Вимикання струму в таких пристроях забезпечується за рахунок примусової комутації, що реалізується за допомогою спеціального попередньо зарядженого конденсатора та комутаційного кола, здатного формувати струм протилежного напрямку та створювати штучний нуль струму [2].

Ефективність роботи таких вимикачів значною мірою визначається параметрами комутаційного кола, які впливають на швидкість формування зустрічного струму, тривалість існування електричної дуги, величину перенапруг та рівень електродинамічних навантажень на контактну систему [3]. Невдалий вибір параметрів комутаційного кола може призвести до зниження ефективності гасіння дуги, збільшення часу вимикання або перевищення допустимих навантажень на елементи схеми.

Окрім вибору методу комутації, істотний вплив на ефективність вимикача має спосіб керування комутаційним колом. У роботі [4] запропоновано підхід, за якого комутаційний струм протилежного напрямку формується після досягнення механічними контактами певної відстані розмикання. Така спосіб є ефективним за невисоких вимог до обмеження струму, проте його ефективність значною мірою залежить від швидкості руху механічного вимикача та характеристик приводу контактної системи.

Таким чином, важливою науково-технічною задачею є визначення оптимальних параметрів елементів схеми примусового дугогасіння, які забезпечують швидке формування зустрічного струму, створення штучного нуля струму та ефективне вимкнення аварійних струмів. До основних параметрів такої схеми належать час дугоутворення до моменту комутації, значення струмообмежувальної індуктивності, ємність конденсатора та початкова напруга його заряду.

У процесі дослідження зазначені параметри варіюються з метою визначення оптимальних значень. Оптимальне поєднання параметрів визначається шляхом виключення режимів, у яких:

− відсутні два різні розв’язки рівнянь комутації струму;

− не забезпечується необхідна часова витримка;

− перевищується допустима початкова швидкість зростання комутаційного струму;

− не забезпечується необхідна тривалість інтервалу нульової напруги.

На основі досліджень сформульовано такі висновки:

1) за умови варіювання лише часу горіння електричної дуги зі збільшенням тривалості дуги критична напруга пробою контактного проміжку спочатку зростає, після чого зменшується, при цьому спостерігається наявність максимального значення;

2) за умови зміни лише індуктивності струмообмежувального дроселя зі збільшенням індуктивності відбувається аналогічна залежність: критична напруга пробою контактного проміжку спочатку зростає, а після досягнення максимального значення зменшується;

3) за умови зміни лише ємності конденсатора критична напруга пробою контактного проміжку монотонно зростає зі збільшенням ємності;

4) за умови зміни лише напруги на конденсаторі критична напруга пробою контактного проміжку зростає зі збільшенням напруги конденсатора;

Запропонований підхід до оптимізації параметрів схеми примусового дугогасіння дозволяє визначити раціональні значення елементів комутаційного контуру, що забезпечують підвищення швидкодії вимикача постійного струму та покращення ефективності процесу гасіння дуги.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Shukla, A.; Demetriades, G.D. A survey on hybrid circuit breaker topologies. IEEE Trans. Power Deliv. 2015, 30, 627–641.

2. Roberto, P.; Loris, Z.; Bonicelli, T. Vacuum breaker for high DC current: Experimental performances and operational limits. IEEE Trans. Plasma Sci. 2009, 37, 229–235.

3. Niwa, Y.; Yokokura, K.; Matsuzaki, J. Fundamental investigation and application of high speed VCB for DC power system of railway. In Proceedings of the 24th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Braunschweig, Germany, 30 August–3 September 2010; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2010; pp. 125–128.

4. Shi, Z.Q.; Jia, S.L.; Ma, M.; Song, X.C.; Yang, H.Y.; Liu, C.;Wang, L.J. Investigation on DC interruption based on artifcial current zero of vacuum switch. In Proceedings of the XXIVth International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Braunschweig, Germany, 30 August–3 September 2010; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2010; pp. 158–161.

УДК 621.316.71

Дубровський В. В.
студ. гр. Е-915м НУ «Запорізька політехніка»

ВАЖЛИВІСТЬ РОЗВИТКУ ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ В УКРАЇНІ

Наша країна зараз безумовно потребує глобальної енергетичної трансформації. Для України, що стикається з наслідками війни, руйнуванням енергетичної інфраструктури та високою залежністю від викопного палива, розробка та реалізація успішних проектів в сфері відновлюваної енергетики є стратегічно важливим завданням.

Нажаль, на теперішній час розвиток цієї галузі стикається з низкою труднощів, зокрема недостатньою інституційною координацією, обмеженістю фінансових ресурсів для реалізації подібних інноваційних проектів та як це

не прикро слабкою інтеграцією відновлюваної енергетики в національну енергосистему.

Розвиток відновлюваної енергетики сьогодні – це і як інвестиція у майбутнє, так і в той самий час отримання "прибутку" для енергосистеми вже зараз. Розвиток відновлюваної енергетики сприяє вирішенню ключових національних завдань, зокрема зміцненню енергетичної безпеки, забезпеченню економічної незалежності та підвищенню якості життя населення.

Відновлювана енергетика охоплює сферу господарської діяльності, науки і техніки, що займається виробництвом, передачею, трансформацією, накопиченням і використанням електричної, теплової та механічної енергії, отриманої з первинних енергоресурсів відновлюваного походження.

Відновлювана енергія генерується з джерел, які постійно відновлюються та можуть бути перероблені, це наприклад сонячна, вітрова, геотермальна та гідроенергія. Енергетична цінність відновлювальних енергоресурсів базується на ознаках безперервності та циклічності відновлення.

Відновлювальні джерела енергії сприяють енергетичній безпеці та екологічній стійкості, економічному зростанню та підвищенню суспільного добробуту, зростанню конкурентоспроможності національної економіки, зміцненню співпраці із європейськими партнерами щодо реалізації проектів у сфері відновлювальної енергетики та обміну досвідом.

Але, слід розуміти, що забезпечення ефективності розвитку сфери відновлюваної енергетики неможливо без злагодженої координації зусиль між державою та приватними суб'єктами господарювання. Цікаво, що енергетична стратегія України до 2050 року визначає довгострокові напрями розвитку енергетичного сектору України, враховуючи глобальні тенденції, виклики та цілі сталого розвитку. Ключовими цілями даного стратегічного документу є перехід на відновлювальні джерела енергії (50% і більше повинна складати їхня частка у виробництві електроенергії), зменшення викидів парникових газів, досягнення кліматичних цілей відповідно до міжнародних угод.

Стратегія низьковуглецевого розвитку визначає довгостроковий курс країни на зменшення викидів парникових газів у контексті боротьби із зміною клімату. Вона розроблена відповідно до міжнародних зобов'язань України та передбачає перехід на низьковуглецеві технології, підвищення енергоефективності, забезпечення адаптації до кліматичних змін та сприяння сталому економічному розвитку.

Значну роль у розвитку відновлювальної енергетики відіграє підтримка іноземних партнерів та залучення держави до міжнародних ініціатив. Україна є членом Міжнародного агентства відновлювальних джерел енергії (IRENA). Агентство сприяє обміну досвідом між країнами у сфері відновлювальної енергетики, зокрема для наслідування передових практик управління та імплементації законодавства розвинутих країн. З жовтня 2023 року ЄС запрова-

див механізм вуглецевого коригування імпорту (CBAM), який зобов'язує експортерів із вуглецевоємних секторів звітувати про викиди вуглецю та сплачувати «коригувальний» збір для покриття різниці у вартості вуглецю. Цей захід стимулює екологічне виробництво за межами ЄС та запобігає переміщенню виробництва до країн із нижчими екологічними стандартами. Якщо підсумувати раніше сказане, то можна з певністю зазначити те, що Україна вже багато зробила для того, аби відновлювальна енергетика приносила свої позитивні результати. Так чому б не рухатись далі в цьому напрямку. В нашій країні існує для цього непоганий потенціал.

Повномасштабне вторгнення ознаменувало новий етап у розвитку відновлювальної енергетики в Україні, спрямований на підвищення стійкості до зовнішніх загроз та забезпечення енергетичної незалежності. Відновлювальні джерела енергії почали розглядатись не лише з екологічної точки зору, ай безпекової та економічної. У європейських країнах розвиток відновлювальної енергетики виступає пріоритетним напрямком політики у боротьбі з глобальним потеплінням і кліматичними змінами, пов'язаними із викидами парникових газів. Сьогодні дана сфера набуває ще більшої стратегічної ваги у забезпеченні енергетичної незалежності, економічного зростання та захисту державності.

УДК 621.316.71
Synetskyi A.
PhD stud., National University "Zaporizhzhia Polytechnic"

INVESTIGATION OF ENERGY CHARACTERISTICS IN A HIGH-VOLTAGE INDUCTION ELECTRIC DRIVE

High-voltage induction motors (HVIMs) traditionally form the basis of electric drives for powerful industrial mechanisms, such as main pumps, compressors, and traction draft machines. Given the significant installed capacity of such units, even a slight decrease in their efficiency leads to colossal electricity overconsumption on a plant-wide scale. The introduction of frequency converters into a high-voltage electric drive opens up broad possibilities for technological optimization; however, supplying the stator windings with non-sinusoidal voltage is accompanied by the occurrence of additional harmonic losses in the machine's steel and copper. In view of this, an in-depth investigation of the energy characteristics of HVIMs, taking into account the specifics of high-voltage insulation, current displacement effects in deep rotor bars, and magnetic core saturation, is an extremely relevant task of modern electrical engineering.

The specificity of electromagnetic processes in high-voltage induction machines requires abandoning simplified linear models and transitioning to a

detailed mathematical description capable of adequately reflecting the spatio-temporal field distribution and energy conversion. The study is based on an enhanced mathematical model of an HVIM implemented in the MATLAB/Simulink simulation environment, which relies on a T-equivalent circuit accounting for the stator core loss loop and non-linear parameters of the rotor circuit. This approach allows for a highly accurate separation of total power losses into constant (magnetic and mechanical) and variable (electrical losses in the stator and rotor windings), as well as accounting for additional losses from higher spatial and temporal harmonics. During the simulation of the operating modes of the frequency-controlled drive, a non-linear dependence was established between the machine's magnetic flux level and the total active power losses at a given load torque. The application of optimization search methods made it possible to identify so-called energy wells—zones of minimum total losses P_{Σ}, which correspond to well-defined values of slip and rotor flux linkage amplitude. Reducing the supply voltage at partial loads leads to a decrease in the magnetizing current and iron losses, which significantly offsets the slight increase in electrical copper losses due to increased slip. The obtained analytical dependencies and simulation results form a rigorous mathematical basis for synthesizing adaptive control systems that adjust the supply voltage and frequency in real time, constantly keeping the high-voltage electric drive at the point of maximum energy optimum regardless of disturbances from the mechanical load.

The conducted study proves that the energy characteristics of a high-voltage induction electric drive significantly depend on the magnetic flux control law, especially in partial load modes. The use of refined mathematical models in the MATLAB/Simulink environment allows localizing the minimums of total power losses with high reliability. The obtained results serve as a scientific basis for the development and implementation of intelligent energy-saving frequency control algorithms, guaranteeing a substantial reduction in operating costs and an improvement in the thermal state of high-voltage electrical machines at industrial enterprises.

УДК 621.316.71
Мішков Д. О.
студ. гр. Е-915м НУ «Запорізька політехніка»

БЕЗЩІТКОВІ ДВИГУНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ: ЕВОЛЮЦІЯ ТА СУЧАСНЕ ЗАСТОСУВАННЯ В ЕЛЕКТРОТЕХНІЦІ

Електродвигуни є невід'ємною частиною сучасного технологічного світу. Серед розмаїття їх типів особливе місце посідають безщіткові двигуни постійного струму. Вони забезпечують роботу величезної кількості пристро-

їв: від систем охолодження продуктивних комп'ютерів та квадрокоптерів до промислових роботів і сучасних електромобілів. Суть цієї технології полягає у відмові від механічних контактів на користь електронного керування.

Недоліки класичних двигунів постійного струму Для розуміння переваг BLDC доцільно розглянути будову класичного колекторного двигуна постійного струму. Його ключовим елементом є щітково-колекторний вузол, який виконує функцію механічного інвертора. Він послідовно змінює напрямок струму в обмотках ротора, забезпечуючи його безперервне обертання в магнітному полі статора.

Проте наявність механічного контакту (тертя щіток об колектор) створює низку критичних проблем:

- Фізичний знос. Щітки поступово стираються і потребують регулярного технічного обслуговування або повної заміни.
- Іскріння та тепловтрати. Тертя та іскроутворення знижують загальний коефіцієнт корисної дії (ККД) і унеможливлюють використання таких двигунів у вибухонебезпечних або легкозаймистих середовищах.
- Електромагнітні перешкоди. Процес іскріння генерує високочастотний шум, який може заважати роботі чутливої електронної апаратури поблизу.

Розвиток силової електроніки та мікроконтролерів дозволив інженерам повністю позбутися механічного колектора. У конструкції BLDC-двигуна розташування основних елементів змінено: постійні магніти знаходяться на рухомому роторі, а обмотки, по яких протікає струм — на нерухомому статорі. Оскільки обмотки зафіксовані, необхідність у рухомих контактах для передачі електроенергії зникає.

Комутація струму в таких двигунах здійснюється електронним контролером. Спеціальні датчики (найчастіше на базі ефекту Холла) безперервно фіксують точне просторове положення магнітного ротора і передають ці дані на мікропроцесор. На основі отриманої інформації контролер через силові транзистори подає імпульси напруги на відповідні обмотки статора у чітко визначені моменти часу. Це створює магнітне поле, що обертається і синхронно тягне за собою ротор.

Відмова від механічної комутації на користь електронної забезпечила безщітковим двигунам низку суттєвих переваг:

1. Високу надійність та довговічність. Відсутність тертьових деталей (окрім опорних підшипників) збільшує робочий ресурс у кілька разів.

2. Енергоефективність. ККД таких двигунів часто перевищує 90% завдяки мінімізації втрат на нагрівання та тертя.

3. Компактність. При менших габаритах BLDC-двигуни здатні генерувати вищий крутний момент порівняно з колекторними аналогами.

4. Точність керування. Електронний контролер дозволяє з надвисокою точністю регулювати швидкість обертання, прискорення та крутний момент.

Завдяки цим характеристикам BLDC-двигуни стали стандартом у багатьох галузях. Вони є основою для систем охолодження ПК, жорстких дисків, сучасного акумуляторного електроінструменту, високоточного медичного обладнання та безпілотних літальних апаратів. Окремо варто відзначити їхню ключову роль у розвитку електротранспорту, де висока ефективність тягового приводу є критичною вимогою.

Отже, перехід від класичних двигунів постійного струму до безщіткових систем є яскравим прикладом того, як інтеграція класичної електромеханіки із сучасною напівпровідниковою електронікою здатна здійснити технологічний прорив. BLDC-двигуни зробили сучасну техніку більш надійною, компактною та енергоефективною, і їхнє впровадження продовжує зростати.

УДК 621.316.71

Demchenko T.[1], Kolyada D.[1]
[1] Master gr. E-915m, National University "Zaporizhzhia Polytechnic"

MODELING OF THE ELECTROMAGNETIC FIELD OF AN INDUCTION MOTOR WITH A SHORT-CIRCUIT ROTOR IN THE EMERGENCE OF ECCENTRICITY

Squirrel-cage induction motors are widely used in various applications due to their simple design, low cost, and reliable operation.

Motor vibration and noise issues have become important performance indicators. This can be avoided by promptly identifying the eccentricity, disconnecting the motor from the power supply, and adjusting the air gap.

Under the influence of uneven load distribution in a three-phase electrical network, voltage asymmetry occurs.

Voltage asymmetry occurs only in a three-phase network under the influence of uneven load distribution across its phases.

Sources of voltage asymmetry are arc steelmaking furnaces, traction substations, electric welding machines, single-phase electrothermal installations and other single-phase, two-phase and asymmetrical three-phase electricity consumers, including household.

Causes of eccentricity: operation at critical speed; incorrect manufacturing technology; mechanical resonance during critical load; bearing wear.

A radial unbalanced magnetic pull arises between the rotor and stator due to eccentricity, which increases the degree of eccentricity of the motor.

The worst thing happens when eccentricity causes rotor-stator friction, which irreversibly damages the stator and rotor cores.

A number of works are devoted to the study of the eccentricity of electric machines.

A distinctive feature of this work is that the studies are carried out using field analysis methods, which ensures the detection and justification of reliable diagnostic signs of eccentricity.

The purpose of this work is to study using the FEMM 4.2 program. electromagnetic processes in an asynchronous motor with a squirrel-cage rotor when eccentricity occurs.

Using the example of an asynchronous motor of type 4A225M2U3, the features of the magnetic field distribution when eccentricity occurs are considered and a harmonic analysis of the field in the air gap is performed.

Determining the distribution pattern and analyzing the electromagnetic field of the AD, its spectral composition, allows us to conclude that there is a malfunction in the engine being diagnosed and to determine its typ.

УДК 621.3:004.43:681.3

Дівчук А.А.[1], Дівчук В.А.[2]
[1] студ. гр. Е-915м НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. Е-214 НУ «Запорізька політехніка»

СУЧАСНІ ТРАНСФОРМАТОРИ З ПОВІТРЯНИМ ОХОЛОДЖЕННЯМ: АРГУМЕНТИ ДОЦІЛЬНОСТІ, КОНСТРУКЦІЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ

Традиційні масляні трансформатори десятиліттями були основою енергетики. Однак вони мають принципові недоліки: використання горючої рідини, ризик витоку нафтопродуктів, необхідність регулярного контролю масла та складні системи пожежогасіння. У відповідь на ці виклики дедалі більшого поширення набувають трансформатори з повітряним охолодженням (сухі трансформатори). Їхня доцільність підтверджується як техніко-економічними розрахунками, так і сучасними глобальними трендами - децентралізацією енергетики, розвитком відновлюваних джерел та жорсткими екологічними нормами.

Трансформатори з повітряним типом охолодження мають низку ключових аргументів на користь досліджень та впровадження.

По-перше: екологічна безпека та відсутність ризиків витоку.

Використання повітряного охолодження повністю виключає ризик розливу нафтопродуктів у ґрунт або воду. Це критично важливо для трансформаторів, встановлених у межах міста, на території харчових виробництв, лікарень або водозаборів. Дослідження дозволяють створити моделі, які працюють із тією ж потужністю, але без «бомби уповільненої дії» для екології.

По-друге: пожежна безпека.

Масляні трансформатори при короткому замиканні або внутрішній дузі можуть вибухати з розбризкуванням гарячої олії. Сухі трансформатори з повітряним охолодженням є самозатухаючими – матеріали класу F або H не підтримують активного горіння. Дослідження в цьому напрямку дозволяють відмовитись від дорогих систем пожежогасіння (азот, спринклери), зменшити відстані між трансформаторами та будівлями, що економить площу в щільній міській забудові.

По-третє: зниження експлуатаційних витрат

Трансформатори з повітряним охолодженням не потребують лабораторного контролю масла, систем маслоочистки чи утилізації відпрацьованих рідин. Оптимізація конструкції дозволяє зменшити експлуатаційні витрати протягом 30-річного циклу життя.

Четверте: робота в екстремальних кліматичних умовах.

Повітря не змінює свого фазового стану. Сучасні дослідження дозволяють створити трансформатори, надійні при -60°C (Арктика) або +50°C (пустеля) без підігріву масла та спеціальних сортів рідини. Це ключовий фактор для енергетики відновлюваних джерел (ВЕС, СЕС у важкодоступних районах).

П’яте: стійкість до високочастотних спотворень.

Сучасна енергоелектроніка (перетворювачі, тягові підстанції) генерує високочастотні спотворення. Через відсутність рідкого діелектрика сухі трансформатори краще переносять високочастотні перенапруги – вони не викликають резонансних явищ у маслі. Дослідження дозволяють створити математичні моделі теплових полів при роботі з ШІМ-сигналами, що критично для «зеленої енергетики» та електротранспорту.

Доцільність досліджень такого типу трансформаторів обумовлена глобальним переходом до децентралізованої енергетики та підвищенням вимог до пожежно-екологічної безпеки в урбанізованих середовищах. Повітряне охолодження є єдиним перспективним рішенням для інтеграції трансформатора безпосередньо в корпус вітряка, дах хмарочоса або зарядну станцію в підземному паркінгу, де масло категорично заборонено.

Сучасне виробництво трансформаторів з повітряним типом охолодження базується на інноваційних методах проектування та високотехнологічних процесах. Основою надійності є двофакторний підхід: високоякісна ізоляція обмоток та продумана конструкція. Найефективнішою технологією є метод вакуумного заливання обмоток спеціальним ізоляційним компаундом, який забезпечує повне усунення повітряних порожнин, посилюючи електричну міцність та термостійкість.

Трансформатори з повітряним типом охолодження знаходять застосування в трьох ключових напрямах: розподіл електроенергії в об’єктах з під-

вищеними вимогами безпеки: лікарні, банки, торгові центри, аеропорти, морські термінали, військові частини; генерація та підвищення рівня електроенергії: альтернативна енергетика (ВЕС, СЕС), ТЕЦ; спеціалізовані задачі в промисловості: перетворювачі, випрямлячі, системи безперервного циклу, індукційні печі, зварювальні комплекси, насосні станції.

Особливо ефективні сухі трансформатори у схемах випрямлячів і тягових перетворювачів завдяки: мінімальним сумарним втратам потужності при роботі з гармоніками; посиленій ізоляції, що витримує імпульсні перенапруги до 125 кВ; практично безшумній роботі.

Для портової інфраструктури перевагами є: інтелектуальна електромережа (стійкість до гармонік), ергономічність (компактність, зменшена маса), гнучкість монтажу в тісних зонах та оптимізований тепловий режим.

Трансформатори з повітряним типом охолодження мають низку переваг порівняно з масляними аналогами:

Підвищена пожежна безпека та мінімальне обслуговування - негорючий епоксидний компаунд.

Економія енергії - розміщення безпосередньо в приміщенні споживача скорочує довжину кабелів низької напруги та втрати.

Висока енергоефективність - зниження загальних втрат енергії на 45% при середніх та високих навантаженнях.

Екологічна відповідальність - мінімальні викиди CO_2, можливість переробки компонентів після виведення з експлуатації.

Спрощений монтаж - не потребує спеціальних фундаментів або майданчиків.

Висока перевантажувальна здатність - краща стійкість до пікових навантажень, можливість збільшення потужності шляхом додавання примусової вентиляції.

Незважаючи на численні переваги, сухі трансформатори мають певні обмеження: залежність від зовнішніх умов – вразливість до вологи, пилу, хімічних речовин. Потребують додаткового захисту (шафи, ковпаки) при монтажі на відкритому повітрі; обмежений функціонал регулювання напруги - відсутність вбудованого ПБВ (перемикання відгалужень під навантаженням). Коригування можливе лише дискретно на стороні ВН при знятому навантаженні; висока початкова інвестиція - вартість сухого трансформатора вища, ніж масляного. Однак цей недолік компенсується нижчими експлуатаційними витратами (відсутність контролю масла, заміни, утилізації).

Трансформатори з повітряним охолодженням є перспективною альтернативою масляним системам, особливо в умовах урбанізації, розвитку відновлюваної енергетики та підвищення вимог до безпеки. Їхні переваги – екологічність, пожежобезпечність, низькі експлуатаційні витрати, стійкість до кліматичних і електромагнітних впливів – роблять їх незамінними на

об'єктах критичної інфраструктури, в житлових і громадських будівлях, на транспорті та в альтернативній енергетиці. Попри вищу початкову вартість та певні конструктивні обмеження, сухі трансформатори забезпечують найкраще співвідношення вартості володіння протягом усього життєвого циклу. Подальші дослідження у напрямку оптимізації теплових полів, удосконалення систем охолодження та зниження вартості виробництва розширять сфери їх застосування та сприятимуть глобальному переходу до децентралізованої «зеленої» енергетики.

УДК 621.3:004.43:681.3
Аліяров Т. Ш.[1], Каптюх К. Л. [2]
[1] студ. гр. Е-915м НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. Е-915м НУ «Запорізька політехніка»

ОСОБЛИВОСТІ ЗАДАЧ ТЕОРЕТИЧНИХ РОЗРАХУНКІВ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

Розглянемо задачу для простого навантаження, що являє собою індуктивність із феромагнітним осердям (рис. 1). Тут R_1, R_μ – активні опори обмотки контуру, що намагнічує; X_{s1}, X_μ – індуктивні опори обмотки (розсіювання та кола намагнічування); $u1, i1$ – відповідно напруга на затискачах кола та струм в обмотці; $e1$ – ЕРС в обмотці.

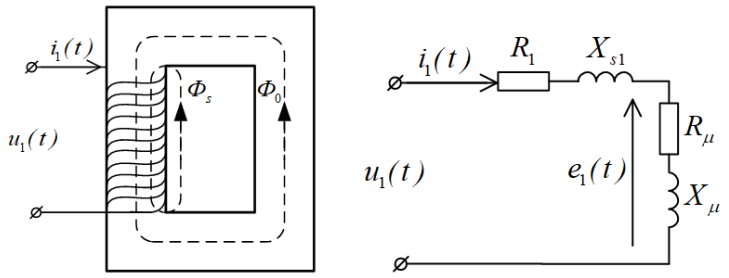


Рисунок 1 – Еквівалентна схема навантаження у вигляді індуктивності з феромагнітним осердям (а) та її електрична схема заміщення (б)

Нехтуючи реальним розподілом магнітного поля в магнітному колі та застосовуючи поділ магнітного потоку на головний $\Phi 0$ і потік Φ_{s1} розсію-

вання, рівняння магнітного кола для обмотки з числом витків W_1 подано у вигляді:

$$u_1 = R_1 i_1 + L_{s1} \frac{di_1}{dt} + W_1 \frac{d\Phi_0}{dt} = R_1 i_1 + L_{s1} \frac{di_1}{dt} + e_1, \quad (1)$$

де L_{s1} – індуктивність обмотки, зумовлена потоком розсіювання.

Рівняння (1) є нелінійним через нелінійний зв'язок між потокозчепленням Ψ_0 і МРС $i_1 W_1$, тому струм, потік і ЕРС у загальному випадку мають несинусоїдний характер.

У досліджуваному колі споживана інтегральна активна потужність витрачається на покриття втрат у міді та втрат у сталі. Оскільки потужності P_1 й P_{cu1} можна визначити безпосередньо вимірюваннями, то потужність P_c, яку неможливо виміряти прямо, часто обчислюють як їх різницю:

$$P_c = P_1 - P_{cu1} \quad (2)$$

.

При застосуванні класичного підходу до аналізу режимів роботи такого кола використовується метод еквівалентних синусоїд. Вибір еквівалентних синусоїд струму та напруги здійснюється двома способами:

– для оцінювання енергетичних процесів – з умови збереження активної потужності в колі:

$$P_1 = I_1 U_1 \cos\varphi_1 + I_2 U_2 \cos\varphi_2 + ... + I_n U_n \cos\varphi_n = U_1 I_1 = U I_1, \quad (3)$$

де $U_1, U_2, ..., U_n$, $I_1, I_2, ..., I_n$ – діючі значення гармонік напруги й струму відповідно; $\cos\varphi_1, \cos\varphi_2, ..., \cos\varphi_n$ – коефіцієнт потужності для кожної гармоніки (при цьому $U_2 = ... = U_n = 0$, $U_1 = U$ і $\cos\varphi_1 = 1$ шукані величини);

– для оцінювання електромагнітних процесів – з умови збереження діючого значення струму:

$$I_e = \sqrt{2} I_1 = \sqrt{2} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_1^2 dt} \quad (4)$$

У другому випадку активна потужність на лінійному активному опорі залишається незмінною та описується співвідношенням $I_1^2 R_1$ ..

Використовуючи положення теорії миттєвої потужності, рівняння енергетичного балансу для миттєвих величин подано у вигляді:

$$i_1^2 R_1 + L_{s1} i_1 \frac{di_1}{dt} + e_1 i_1 = u_1 i_1 \quad (5)$$

Складові миттєвих напруг, струму та потужності визначалися з використанням швидкого перетворення Фур'є відповідно до рекомендацій, наведених у попередньому розділі.

Висновки

У результаті аналізу встановлено, що класичний підхід до моделювання електричних кіл із феромагнітними елементами, заснований на методі еквівалентних синусоїд, дозволяє спростити розрахунки енергетичних характеристик, але потребує вибору умов еквівалентування залежно від мети дослідження (енергетичні чи електромагнітні процеси).

Застосування теорії миттєвої потужності разом із швидким перетворенням Фур'є дає змогу більш точно враховувати несинусоїдність струмів і напруг, що особливо важливо для задач, пов'язаних із втратами в сталі та міді силових трансформаторів.

Отримані рівняння енергетичного балансу (2) і (5) підтверджують, що втрати в феромагнітному осерді не можна виміряти безпосередньо, тому їх доцільно визначати через різницю загальної активної потужності та втрат у міді.

Розроблені підходи можуть бути використані для подальшого вдосконалення методів теоретичних розрахунків силових трансформаторів, зокрема для врахування вищих гармонік і нелінійності магнітних кіл.

УДК 621.316.71

Пінчук Д.М.[1], Ковальков Р.М.[2]
[1]студ. гр. Е-915м НУ «Запорізька політехніка»
[2]студ. гр. Е-264сп НУ «Запорізька політехніка»

ВІДНОВЛЮВАНА ЕНЕРГЕТИКА: СТРАТЕГІЧНИЙ ШЛЯХ ДО ЕКОЛОГІЧНОЇ ТА ЕНЕРГЕТИЧНОЇ БЕЗПЕКИ

Сучасну цивілізацію неможливо уявити без безперервного споживання енергії, проте енергетична парадигма, якою людство користувалося впродовж останнього століття, наближається до своєї критичної межі. Вичерпність

традиційних викопних ресурсів є математичним фактом: за сучасних темпів споживання розвіданих світових запасів нафти та газу вистачить орієнтовно на півстоліття, а вугілля — на кілька сотень років. Крім того, ставка виключно на атомну генерацію, яка колись вважалася панацеєю, сьогодні переглядається багатьма країнами через високі екологічні та техногенні ризики. З огляду на це, глобальна наука та інженерія спрямували вектор розвитку на технології, що використовують невичерпні ресурси природи. Провідні країни світу вже розглядають альтернативну енергетику, до якої відносять сонячне випромінювання, енергію вітру, біомасу, гідроенергію малих річок, геотермальні джерела та теплові скиди промисловості, не просто як екологічну ініціативу, а як фундамент своєї національної безпеки.

Одним із найбільш перспективних напрямків для держав із потужним аграрним сектором є використання біомаси, зокрема сільськогосподарських відходів. Наприклад, солома є потужним і доступним альтернативним енергоносієм, надлишок якої в Україні оцінюється у мільйони тонн. За розрахунками фахівців, раціональне використання соломи здатне забезпечити паливом тисячі малих теплогенеруючих установок для обігріву житлового фонду. Ефективність цього підходу довів французький винахідник українського походження Жан-Марі Турянський, чия технологія спалювання спресованої соломи демонструє високу рентабельність: один тюк вагою 350 кг при згорянні здатен замінити близько 120 літрів мазуту, генеруючи понад 100 кВт теплової енергії. Це не лише знижує залежність від імпортного газу, а й забезпечує суттєве зменшення викидів.

У світовій практиці також стрімко зростає інтерес до біогазових установок, які виконують одразу дві функції: генерують енергію та утилізують органічні відходи. Для великих тваринницьких та птахоферм ці комплекси є критично необхідними, оскільки процес анаеробного зброджування дозволяє конвертувати відходи у висококалорійний біогаз та якісні, позбавлені патогенної мікрофлори добрива. Таким чином, отримання енергії стає економічно вигідним побічним ефектом від вирішення проблеми забруднення довкілля, і навіть одна локальна установка здатна забезпечити фермерське господарство автономним теплом та гарячою водою протягом усього року.

Водночас не втрачає актуальності і використання енергії вітру, що має в Україні глибоке історичне підґрунтя. Якщо до Другої світової війни успішно функціонували тисячі локальних вітроагрегатів малої потужності, то сьогодні розробляються та впроваджуються промислові вітрогенератори мегаватного класу, що суттєво диверсифікують джерела постачання електроенергії.

Поряд із цим, найпотужнішим джерелом енергії для нашої планети залишається Сонце. Кліматичні умови багатьох регіонів є надзвичайно сприятливими для розвитку геліоенергетики, адже середньорічна кількість сумарної сонячної радіації, що надходить на один квадратний метр горизонтальної

поверхні в Україні, коливається в межах 1000–1400 кіловат-годин. Цього інсоляційного потенціалу цілком достатньо для ефективної експлуатації фотоелектричних станцій та сонячних колекторів практично на всій території країни.

Ставлення до енергетики сьогодні фактично визначає вектор цивілізаційного розвитку держав. Перехід до відновлюваних джерел — це не просто данина екологічним трендам, це єдиний прагматичний шлях до забезпечення енергетичної незалежності, розвитку децентралізованих систем генерації та збереження довкілля для майбутніх поколінь.

УДК 621.316.71
Коціло Д.О.
студ. гр. Е-274 НУ «Запорізька політехніка»

ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В СИСТЕМАХ УПРАВЛІННЯ ВІТРОПАРКАМИ ДЛЯ МАКСИМІЗАЦІЇ ЇХ ККД

Сучасний розвиток енергетики характеризується активним переходом до використання відновлюваних джерел енергії, серед яких важливе місце займає вітрова енергетика. Вітрові електростанції дозволяють отримувати електроенергію без значного негативного впливу на навколишнє середовище, однак їх ефективність значною мірою залежить від змінних природних факторів, зокрема швидкості та напрямку вітру. У зв'язку з цим актуальним є використання сучасних методів обробки даних, зокрема штучного інтелекту, для оптимізації роботи вітропарків.

Потужність вітрової турбіни визначається залежністю від швидкості вітру, причому вона пропорційна кубу швидкості повітряного потоку. Це описується класичною залежністю:

$$P = \frac{1}{2}\rho A v^3 C_p \tag{1}$$

де P — потужність, ρ — густина повітря, A — площа ротора, v — швидкість вітру, Cp — коефіцієнт використання енергії вітру.

Для ілюстрації цих розрахунків було розроблено програмний алгоритм мовою Python (див. ис. 1), який обчислює потужність для різних швидкостей вітру на основі заданих початкових параметрів.

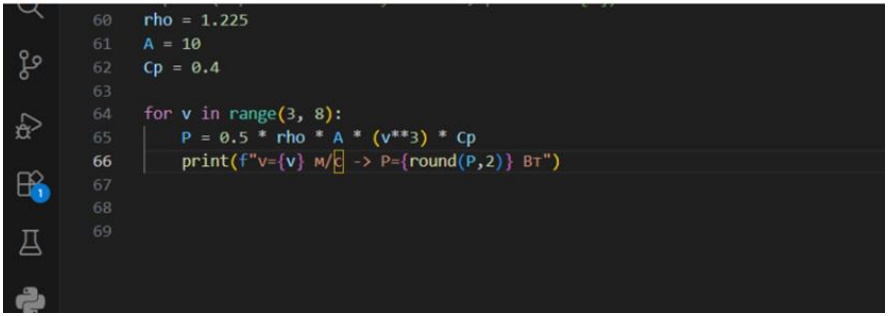


Рисунок 1 — Програмна реалізація алгоритму розрахунку потужності вітротурбіни

Відповідно, навіть незначні флуктуації швидкості вітру призводять до суттєвих коливань обсягів виробленої електроенергії. Поряд із цим, на загальну ефективність функціонування вітропарків впливає комплекс додаткових факторів, зокрема: рівень турбулентності повітряного потоку, аеродинамічна взаємодія між турбінами, просторовий кут атаки лопатей та експлуатаційні режими роботи генератора. Багатовимірність і висока динаміка цих параметрів ускладнюють їх контроль традиційними детермінованими методами, що зумовлює об'єктивну необхідність впровадження інтелектуальних систем управління.

Інтеграція технологій штучного інтелекту (ШІ) та машинного навчання відкриває принципово нові можливості для підвищення ККД вітропарків. Обробка масивів даних із сенсорів та систем SCADA дозволяє здійснювати високоточне прогнозування метеорологічних умов, адаптивно керувати параметрами турбін у реальному часі та синхронізувати їхню роботу. Крім того, ШІ є основою для предиктивного технічного обслуговування (predictive maintenance): безперервний аналіз телеметрії (вібрацій, температур, навантажень) дає змогу ідентифікувати аномалії та прогнозувати відмови обладнання до їх виникнення, що мінімізує час простою та експлуатаційні витрати.

Для практичної ілюстрації використання методів машинного навчання в цій предметній області доцільно розглянути спрощену модель прогнозування вихідної потужності вітрової турбіни залежно від швидкості вітру. Програмну реалізацію даного алгоритму мовою Python наведено на рис. 2.

З метою верифікації можливостей технологій штучного інтелекту в рамках дослідження було розроблено та застосовано регресійну модель, що формалізує функціональну залежність між швидкістю вітрового потоку (вхідна змінна) та обсягами генерації електроенергії (цільова змінна). Апробація навченої моделі продемонструвала високу точність предиктивного аналізу:

зокрема, розрахункова вихідна потужність за швидкості вітру 6 м/с становила 82,5 умовних одиниць.

```
    import numpy as np
from sklearn.linear_model import LinearRegression

wind_speed = np.array([[3], [4], [5], [6], [7]])
power_output = np.array([20, 35, 55, 80, 110])

model = LinearRegression()
model.fit(wind_speed, power_output)

prediction = model.predict([[6]])

print("Прогнозована потужність:", prediction[0])
```

Рисунок 2 — Фрагмент програмного коду алгоритму машинного навчання для прогнозування генерації

Отримані емпіричні результати переконливо доводять доцільність і високу ефективність імплементації методів машинного навчання для математичного моделювання та прогнозування складних технологічних процесів у сфері відновлюваної енергетики.

УДК 621.311
Криленко Є. Є.
студ. гр. Е-254 НУ «Запорізька політехніка»

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ЕЛЕКТРИЧНІ МЕРЕЖІ (SMART GRID) ЯК ОСНОВА МОДЕРНІЗАЦІЇ ЕНЕРГОСИСТЕМ УКРАЇНИ

Сучасний етап розвитку енергетики характеризується переходом від традиційних електричних мереж до інтелектуальних систем керування, відомих як Smart Grid. В Україні проблема зношеності електромереж є однією з найактуальніших: за даними досліджень Міністерство енергетики України, близько 65–75% електромереж та понад 70% трансформаторного обладнання експлуатуються понад нормативний термін (25–30 років). Події останнього десятиліття, зокрема енергетична криза 2014 року та масовані атаки на енергосистему у 2022–2024 роках, призвели до втрат понад 40% генеруючих потужностей у пікові періоди. У цих умовах, як зазначають українські науковці Олександр Кириленко та Валерій Кулик, впровадження Smart Grid є критично необхідним для підвищення стійкості енергосистеми.

Smart Grid — це інтелектуальна електромережа, яка поєднує традиційні енергетичні об'єкти з сучасними інформаційно-комунікаційними технологіями. Концепція активно розвивалася завдяки роботам таких дослідників, як Massoud Amin, якого часто називають «батьком Smart Grid». Основною особливістю системи є двосторонній обмін інформацією між постачальником і споживачем електроенергії з інтервалом передачі даних від 1 секунди до 15 хвилин. До складу Smart Grid входять електростанції (потужністю від кількох кВт до 1000+ МВт), підстанції, лінії електропередач, інтелектуальні лічильники (Smart Meter), системи SCADA та центри обробки даних. Впровадження Smart Meter дозволяє знизити втрати електроенергії на 10–15% та підвищити точність обліку до 99,5%.

Схема Smart Grid базується на інтеграції всіх елементів енергосистеми в єдину цифрову платформу. Генерація включає як великі електростанції, так і децентралізовані джерела (сонячні та вітрові установки потужністю 5–500 кВт для домогосподарств). Через мережі передачі (110–750 кВ) та розподілу (0,4–35 кВ) електроенергія надходить до споживачів. «Розумні» лічильники передають дані в центри керування, де автоматизовані системи аналізують інформацію та регулюють навантаження. Це дозволяє зменшити пікові навантаження на 20–30% та скоротити аварійні відключення до 25%.

Важливою подією у розвитку Smart Grid стало прийняття у США у 2007 році Закону про енергетичну незалежність та безпеку (EISA), ініційованого за підтримки уряду та експертів, серед яких George W. Bush. У Європейському Союзі розвиток Smart Grid активно підтримується з 2010 року в рамках програм «Horizon 2020», бюджет якої склав понад 80 млрд євро, та «Green Deal», що передбачає скорочення викидів CO_2 на 55% до 2030 року. В Україні, як зазначає Герман Галущенко, перші пілотні проєкти Smart Grid почали впроваджуватись після 2015 року, а рівень встановлення інтелектуальних лічильників у 2024 році досяг приблизно 15–20% домогосподарств.

Основними проблемами впровадження Smart Grid в Україні є висока вартість модернізації (за оцінками — понад 10–15 млрд доларів), недостатній рівень цифровізації (менше 25% мереж автоматизовано) та загрози кібербезпеки. Водночас переваги є значними: зниження технічних втрат з 12–14% до 7–8%, підвищення надійності електропостачання до 99,9% та можливість інтеграції понад 30% відновлюваних джерел енергії в енергобаланс.

Перспективи розвитку Smart Grid в Україні пов'язані з інтеграцією до європейської мережі ENTSO-E (синхронізація відбулася у 2022 році), розвитком електромобільності (очікуване зростання до 1 млн електромобілів до 2035 року) та впровадженням «розумних міст». За прогнозами експертів, до 2030 року рівень цифровізації енергосистеми може досягти 50–60%.

Завданнями на майбутнє є модернізація електромереж, впровадження інтелектуальних систем обліку, розвиток цифрової інфраструктури, забезпе-

чення кіберзахисту (з урахуванням понад 200 кібератак на енергосектор у 2022–2023 роках) та підготовка висококваліфікованих спеціалістів. Реалізація цих заходів дозволить підвищити ефективність енергосистеми України на 20–30% та забезпечити її стабільний розвиток.

УДК 621.3:004.43:681.3
Загайкевич М.В.[1], Крітіна Д.С.[1]
[1] студ. гр. Е-274 НУ «Запорізька політехніка»
[1] студ. гр. Е-274 НУ «Запорізька політехніка»

ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ ЗАСОБАМИ PYTHON

В попередніх дослідженнях було теоретично обґрунтовано доцільність використання Python для задач електротехніки: аналіз сигналів, моделювання схем, системи керування, IoT. Однак теоретичних переваг недостатньо, необхідна практична перевірка. Метою даного дослідження була реалізація чисельного та символьного моделювання перехідних процесів у RLC-колах засобами Python, порівняння з аналітичними розрахунками та оцінка продуктивності відносно альтернативних інструментів (MATLAB, C++).

Для моделювання обрано наступний стек бібліотек.

PySpice – інтерфейс до SPICE-симулятора NGSPICE, дозволяє виконувати транзієнтний аналіз без написання netlist-файлів вручну.

Lcapy – символьний аналіз електричних кіл на основі SymPy, автоматичне виведення диференціальних рівнянь та передавальних функцій.

SciPy.integrate – чисельне розв'язання систем звичайних диференціальних рівнянь (ЗДР) методом Рунге-Кутта 4-5 порядку.

NumPy – векторні обчислення для масивів даних.

Matplotlib – візуалізація перехідних характеристик у реальному часі.

В процесі роботи було розроблено скрипт для моделювання послідовного RLC-контуру (R=10 Ом, L=0.1 Гн, C=100 мкФ) при стрибкоподібному вхідному сигналі (амплітуда 10 В) з нульовими початковими умовами. Окремо реалізовано модель з використанням PySpice (транзієнтний аналіз на 50 мс з кроком 0.1 мс) та модель через розв'язання ЗДР другого порядку:

$$L \cdot C \cdot u_C''(t) + R \cdot C \cdot u_C'(t) + u_C(t) = u_{in}(t) \quad (1)$$

Аналітичний розв'язок отримано за допомогою Lcapy та перевірено вручну для трьох режимів (коливальний, аперіодичний, критичний).

Для заданих параметрів (R=10 Ом) обчислено коефіцієнт затухання $\alpha = R/2L = 50$ с$^{-1}$ та резонансну частоту $\omega_0 = 1/\sqrt{LC} \approx 316{,}23$ рад/с, що

відповідає коливальному режиму ($\alpha < \omega_0$). Отримані залежності струму i(t) та напруги на конденсаторі $u_C(t)$ повністю збігаються між реалізаціями PySpice, SciPy та аналітикою. Максимальна відносна похибка, порівняно з аналітичним розв'язком, не перевищує 0.5% для SciPy та 0.7% для PySpice (через дискретизацію). Час виконання одного симуляційного прогону (5000 точок) становив: SciPy – 0.12 с, PySpice (з викликом NGSPICE) – 0.45 с, що є прийнятним для інтерактивної роботи.

Інтерактивна візуалізація (sliders для R, L, C) дозволяє в реальному часі змінювати параметри та спостерігати перехід від коливального до аперіодичного режиму без перекомпіляції коду. Це дає змогу використовувати розроблений скрипт як навчальний інструмент у лабораторному практикумі з електротехніки.

Було проведено порівняння з аналогічними реалізаціями в MATLAB (Simulink + ode45) та на C++ (бібліотека Boost.Odeint, з компіляцією GCC -O2). Час розробки скрипту MATLAB становив близько 20 хвилин при використані вбудованих блоків Simulink, точність є аналогічною. Для C++ час розробки склав близько 2 годин, через необхідність ручного написання схеми Ейлера-Кромера та роботу з файлами введення/виведення.. Час виконання склав 0.01 с, що швидше за Python в 12 разів, але складність модифікації коду та візуалізації значно вища. При використанні Python час розробки склав 30 хвилин, з урахуванням часу на встановлення бібліотек. Швидкодія при цьому була достатня для навчальних та багатьох інженерних задач.

Таким чином, Python забезпечує найкращий баланс між швидкістю розробки, вартістю та продуктивністю для задач моделювання електричних кіл середньої складності (до кількох тисяч вузлів). Недоліком залишається нижча швидкодія при моделюванні великих енергосистем (понад 10^5 рівнянь), де доцільно використовувати C++ або спеціалізовані пакети (PSCAD, EMTP). Однак для більшості задач кафедри електричних машин (аналіз перехідних процесів у двигунах, моделювання випрямлячів, фільтрів) ресурсів Python достатньо.

Практичне моделювання підтвердило, що Python з бібліотеками PySpice, Lcapy та SciPy є повноцінною заміною MATLAB у задачах аналізу перехідних процесів в RLC-колах. Розроблений скрипт може бути використаний у лабораторному практикумі, а також як основа для більш складних досліджень.

Отримані результати свідчать, що Python є не лише перспективним, але й практично готовим інструментом для сучасної електротехніки, особливо в умовах обмеженого бюджету.

УДК 621.314.222.6
Якубін Р.О.[1], Терещенко Д.А.[2]
[1] студ. гр. Е-273 НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. Е-213 НУ «Запорізька політехніка»

ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА FEM-ВАЛІДАЦІЯ МЕТОДУ РОЗРАХУНКУ ІНДУКТИВНОСТІ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

В попередніх дослідженнях було розроблено аналітичний метод розрахунку індуктивності трифазного тристержневого трансформатора, що враховує вертикальну та горизонтальну складові потоків розсіювання. Метод показав похибку моделювання струму короткого замикання до 8%, однак потребував подальшої верифікації на інших режимах роботи та порівняння з чисельними методами вищого порядку. Метою дослідження є програмна реалізація запропонованого методу, його порівняльний аналіз з FEM-моделюванням (ANSYS) та експериментальна перевірка на реальному трансформаторі потужністю 10 кВА.

Для автоматизації розрахунків розроблено програмний модуль на мові Python з використанням бібліотек NumPy та SymPy. Вхідними параметрами модуля є геометричні розміри трансформатора (висота та радіальна товщина обмоток ВН і НН, ширина вікна магнітопроводу, довжина осердя, кількість витків, тип шихтовки). Модуль автоматично будує систему рівнянь для розрахунку взаємної індуктивності M та індуктивності розсіювання Lσ з урахуванням коефіцієнтів Роговського та поправочних функцій на горизонтальні потоки.

Паралельно створено 3D-модель того ж трансформатора в ANSYS. Проведено серію симуляцій для трьох режимів: холостий хід, номінальне навантаження та коротке замикання. Для верифікації використано реальний трансформатор ТМ-10/0,4, з якого знято осцилограми струмів короткого замикання.

Для режим короткого замикання для розробленого аналітичного методу дав похибку 7.8% відносно експерименту, FEM-модель – 3.2%. Така різниця може бути зумовлена спрощенням форми магнітопроводу та ігноруванням явища гістерезису в аналітичному методі. Для режиму номінального навантаження похибка аналітичного методу зросла до 11% через неврахування насичення осердя, для FEM з урахуванням кривої намагнічування – 4.5%. При цьому час розрахунку для аналітичного методу на Python склав 0.3 секунди, для FEM, з використанням 8-ядерного процесору – 12 хвилин.

Таким чином, аналітичний метод є доцільним для попередніх інженерних розрахунків та систем релейного захисту реального часу, тоді як FEM рекомендується для остаточної верифікації та дослідження локальних зон насичення.

УДК 621.47:523.9-852:621.5.015.2
Олійник Д.Є.[1], Мокроусов К.С.[2]
студ. гр. Е-273 НУ «Запорізька політехніка»
студ. гр. Е-214сп НУ «Запорізька політехніка»

ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ АКТИВНОГО ВІДСТЕЖЕННЯ СОНЦЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СОНЯЧНИХ КОЛЕКТОРІВ

У попередньому досліджені було теоретично обґрунтовано, що використання рухомих сонячних колекторів дозволяє підвищити збір сонячної радіації до 25% порівняно з нерухомими. Однак розрахунки виконувалися для дискретних моментів часу без урахування реальних метеоумов та динаміки роботи стеження. Метою даного дослідження була розробка програмної моделі системи активного відстеження Сонця, її симуляція для різних типів трекерів (одноосьовий та двохосьовий) та оцінка реального приросту генерації електроенергії з урахуванням власного енергоспоживання системи стеження. Реалізацію моделі виконано на мові Python, використовувались бібліотеки: pvlib для розрахунку сонячних кутів та інсоляції для будь-якої географічної точки, numpy для векторних обчислень, pandas для обробки часових рядів та matplotlib для візуалізації. Вхідними даними були географічні координати (с. Широке, Запорізька обл.: 47.69° пн.ш., 35.31° сх.д.), тип трекера (нерухомий з фіксованим кутом нахилу, одноосьовий горизонтальний, одноосьовий вертикальний, двохосьовий), потужність колектора (умовно 1 кВт), коефіцієнт корисної дії (0.18), а також споживана потужність приводами трекера (для активних систем – 50 Вт·год на добу для одноосьового, 100 Вт·год для двоосьового). Розрахунки виконано для кожного дня року з кроком 10 хвилин. Для нерухомого колектора обрано оптимальний кут нахилу, що дорівнює широті місцевості, тобто приблизно 47°. Для рухомих систем змодельовано алгоритми стеження: двоосьовий трекер утримує нормаль до поверхні паралельною сонячним променям, забезпечуючи кут падіння 0°, а одноосьовий повертається навколо вертикальної осі, фіксуючи кут нахилу за місячним оптимумом. Отримано річну сумарну сонячну радіацію на похилу поверхню для кожного типу системи. Нерухомий колектор з оптимальним кутом дає 1420 кВт·год/рік на 1 кВт встановленої потужності. Одноосьовий горизонтальний трекер, який обертається за азимутом, забезпечує 1680 кВт·год/рік, що на 18.3% більше відносно нерухомого. Одноосьовий вертикальний трекер, що обертається за висотою, дає 1590 кВт·год/рік, забезпечуючи приріст 12.0%. Двоосьовий трекер дозволяє отримати 1775 кВт·год/рік, що підтверджує попередню оцінку приросту в 25%. Однак після врахування власного енергоспоживання приводів стеження чиста генерація зменшується. Для двоосьового трекера добове споживання 100 Вт·год за рік дає

36.5кВт·год втрат, тому чистий приріст знижується до 23.5%. Для одноосьового горизонтального трекера річне споживання 18.25 кВт·год зменшує чистий приріст до 17.3%. Додатково було введено коефіцієнт реальної хмарності для Запорізької області, де середньорічна кількість сонячних годин становить близько 2250. Моделювання показало, що в похмурі дні, коли переважає дифузна радіація, ефективність стеження падає до 3-5% приросту, але в середньому за рік це зменшує загальний приріст лише на 2%. Також досліджено вплив похибок орієнтації до ±5°, що знижує ефективність на 1-2%, що є допустимим для бюджетних трекерів. Для типової домашньої сонячної електростанції потужністю 5 кВт вартість двоосьового трекера складає близько 67 500 грн. Річний додатковий виробіток становить 355 кВт·год, а для 5 кВт – 1775 кВт·год. При «зеленому тарифі» 5.4 грн/кВт·год за кіловат-годину, що еквівалентно 5.4 грн за кіловат-годину, додатковий річний дохід складає 9 585 грн. Таким чином, термін окупності двоосьового трекера становить близько 7 років. Для одноосьового трекера вартість дорівнює 36 000 грн, додатковий виробіток на 5 кВт становить 1300 кВт·год на рік, що при тому ж тарифі дає річний дохід 7 020 грн, а отже окупність становить приблизно 5.1 року. Враховуючи зниження вартості компонентів, одноосьові системи є більш економічно доцільними для помірних широт.

Таким чином, в роботі розроблено програмну модель на Python з використанням бібліотеки pvlib, яка дозволяє з високою точністю розраховувати річний виробіток сонячних колекторів з різними типами стеження для будь-якої локації. Підтверджено, що двоосьовий трекер забезпечує максимальний приріст у 25%, однак після врахування енергоспоживання та вартості обладнання одноосьовий горизонтальний трекер буде більш вигідним завдяки окупності в 5 років. Встановлено, що для Запорізької області оптимальним є використання одноосьових трекерів з обертанням за азимутом, що дозволяє отримати чистий приріст генерації понад 17% без суттєвого ускладнення системи.

УДК 621.3:004.43:681.3
Доценко А.А.[1], Опанасенко А.М.[2]
[1] студ. гр. Е-215сп НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. Е-214сп НУ «Запорізька політехніка»

«ЗЕЛЕНЕ» ПІДПРИЄМНИЦТВО, ЯК МЕХАНІЗМ ВИЖИВАННЯ ТА ВІДБУДОВИ

Війна зробила українську енергетику вразливою як ніколи. Ракетні атаки виводять з ладу ТЕЦ, підстанції та магістральні мережі. І саме в цей мо-

мент альтернативна енергетика перестає бути «зеленою розкішшю» - вона стає питанням національної безпеки.

Що ми маємо?

Сонце, вітер, вода й тепло Землі. Ці джерела, на відміну від вугілля чи газу, не треба возити з-за кордону чи захищати від ворожих обстрілів на довгих логістичних маршрутах. Сонячна панель на даху багатоповерхівки або вітряк у степу - це не просто екологічно, це ще й незалежно.

В Україні більше сонячних днів на рік, ніж у Німеччині, де сонячна генерація давно стала звичною справою. Встановити панелі на власному домогосподарстві чи бізнесі - це не лише зменшити рахунки, а й мати світло навіть тоді, коли центральну мережу відключили. Дуже важливо те, що Сонце світитиме ще приблизно 5 мільярдів років. А це означає, що сонячна енергія є не лише відновлюваною, але й практично невичерпною. Крім того, її використання не створює небажаних екологічних наслідків (немає викидів CO_2, немає теплового забруднення).

Степові зони України (Запоріжжя, Херсонщина, Одещина) мають чудовий вітровий потенціал. Сучасні вітряки майже не шумлять і займають мінімум землі. Так, їх не розмістиш у густонаселеному районі, але на узбережжях чи полях - цілком. (Історична довідка: Енергію вітру в Європі використовують ще з XII століття - завдяки вітряним млинам. Сьогодні великі вітрові турбіни перетворюють енергію вітру на електрику з ККД, про який середньовіччя не могло й мріяти.)

В нашій країні є і великі ГЕС, і можливість будувати малі гідроелектростанції на невеликих річках. Головний плюс - стабільність (на відміну від вітру, який може стихнути, вода тече постійно). Мінус - висока вартість будівництва та екологічні ризики для річок.

Гідроенергетика дає майже третину електроенергії, що споживається у світі. Наприклад, Норвегія, де виробництво електроенергії на душу населення є одним із найвищих, живе майже виключно за рахунок гідроенергії.

Геотермальна енергія - це тепло земних надр. В Україні найбільш перспективні зони - Закарпаття та Крим (тимчасово окупований, але потенціал залишається українським). Поки що дорого, але для місцевих громад у горах може стати порятунком.

Застереження для використання геотермальних ресурсів є їх зосередження переважно у вулканічних зонах на межах коркових плит. Тому значний внесок цього джерела можна очікувати лише в окремих локальних географічних зонах (Ісландія, Італія, Нова Зеландія, а також наше Закарпаття).

Зараз процес активного розвитку відновлюваних джерел енергії гальмує нестабільність (залежність від погоди): сонця немає вночі та в хмарну погоду; вітер може дути не тоді, коли треба. Будь-яка незначна зміна погоди знижує виробництво енергії з цих джерел. Тому покладатися лише на один

вид відновлюваного джерела енергії (ВДЕ) не варто. Рішення - комбінація різних джерел плюс системи накопичення енергії (акумулятори).

Для виробництва великої кількості енергії потрібно встановлювати багато сонячних панелей або вітряних турбін, а це потребує значних територій. Не кожна громада готова віддати десятки гектарів. Сонячна, вітрова або гідроенергія доступна не в усіх регіонах. Це означає, що все одно доведеться створювати інфраструктуру для транспортування енергії. Встановлення відповідного обладнання потребує значних інвестицій. Додатковим мінусом є: вітряні турбіни та сонячні панелі можуть становити загрозу для дикої природи (птахів, кажанів), а також створюють шум, що є проблемою для сусідніх будинків.

Але є й потужні аргументи на користь відновлюваної енергетики:

- Стабільні ціни на енергоносії. Збільшення або зменшення пропозиції викопного палива безпосередньо впливає на інфляцію. Вартість виробництва енергії з ВДЕ залежить від грошей, витрачених на інфраструктуру, а не від завищеної ціни природного ресурсу. Отже, коли основна частина енергії надходитиме з відновлюваних джерел, можна очікувати стабільних цін.
- Постійне джерело енергії. Сонце світитиме ще мільярди років, вода тече постійно, вітри дмуть - це означає, що ВДЕ здатні забезпечувати негайний і постійний джерело енергії для регіону.
- Надійність. Коли джерело викопного палива вичерпується, весь процес потрібно переносити. ВДЕ ж, опинившись на місці, мають постійне джерело «палива». І головне: на відміну від викопного палива, постачання якого може постраждати від наприклад війни, страйків, торговельних суперечок і політичної нестабільності, сонце світить і вітер дме всюди, і кожна країна може використовувати цю енергію для виробництва чистої енергії у великих масштабах.
- Незалежність. Поки енергетичні об’єкти зазнають масштабних руйнувань, сонячна панель на даху продовжує працювати (якщо є інвертор та акумулятор).
- Екологія. Жодних викидів CO_2, жодного теплового забруднення річок, як після ТЕЦ. Жодного парникового газу (метану), якого в природному газі до 95%.
- Робочі місця. Монтаж, обслуговування, виробництво компонентів - це нова галузь, яка може працевлаштувати тисячі людей.

Виробництво енергії з ВДЕ поки що значно поступається викопному паливу, але потенціал вітру, сонця та води є колосальним.

Виробництво ВДЕ поки що невелике, але потенціал зростання - у декілька разів. Особливо це стосується вітрової енергії (потенціал майже в 5 разів перевищує поточне виробництво) та сонячної (в 4,5 разів). Оскільки жодне джерело ВДЕ не є ідеальним, найкраща стратегія - комбінація сонця, вітра та

малої гідроенергетики, з обов'язковим додаванням системи накопичення. Так нестабільність одного джерела компенсується іншим.

Україна не може довго чекати на повільний перехід до «зеленої» енергетики. Альтернативні джерела - це не мода, а інструмент виживання. Вони мають недоліки: залежність від погоди, великі площі, висока початкова вартість, але недоліки залежності від одного ворожого удару по ТЕЦ — набагато критичніші. І хоча в сучасному світі ще не відчувається нестача енергоресурсів, у найближчі два-три десятиліття можливі серйозні труднощі, якщо альтернативні джерела енергії не стануть користуватися попитом.

УДК 621.3:004.43:681.3
Зубченко І.Г.[1], Бойко Р.М.[2]
[1] студ. гр. Е-214 НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. Е-215сп НУ «Запорізька політехніка»

ТРАНСФОРМАЦІЯ ЕКОЛОГІЧНИХ СТРАТЕГІЙ У МЕХАНІЗМИ ЕКОНОМІЧНОЇ СТІЙКОСТІ ТЕРИТОРІАЛЬНИХ ГРОМАД

Коли ми уявляємо «зелену трансформацію», перед очима постають європейські містечка з сонячними панелями та електрокарами. Однак сьогодні найпотужнішим полігоном для екологічного оновлення несподівано стала Україна - країна, що зазнає колосальних руйнувань через війну. Парадоксально, але аналіз стратегій засвідчує: «зелене» підприємництво перетворюється на механізм виживання та розумної відбудови по всій території держави.

Донедавна розмови про екологічний бізнес в Україні залишалися переважно в площині наукових дискусій. Однак оновлені регіональні стратегії розвитку та загальнонаціональні програми відновлення змінили правила гри. Вони заклали концептуальний фундамент, де ресурсоефективність, інновації та низьковуглецевий розвиток стали офіційними пріоритетами. Це не просто папірці — це легітимний дозвіл бізнесу думати «зелено» та інвестувати в екотехнології.

Програми економічного і соціального розвитку на найближчі роки створили практичне замовлення: від енергоефективного обладнання для ЖКГ до послуг з екологічного аудиту. Влада на місцях та національний уряд сформували попит, на який має відреагувати малий та середній бізнес.

До речі: За оцінками Київської школи економіки, екологічні збитки від війни вже перевищують 2 трильйони гривень. Але кожен мільйон, вкладений сьогодні в «зелену» когенерацію або сонячну станцію для лікарні, економить десятки мільйонів завтра на закупівлі дизпалива чи підключенні до зруйнованих мереж.

Найцікавіше відбувається на рівні конкретних комунальних підприємств по всій Україні. Інвестиційні програми водоканалів, теплокомуненерго та інших операторів інфраструктури - це не просто латання дірок. Йдеться про масштабну реконструкцію зруйнованих та зношених мереж, заміну старого енергоємного обладнання на сучасне, зменшення втрат води й тепла, підвищення стійкості систем.

Чому це важливо для звичайного підприємця? Тому що ці проєкти створюють ринок для локальних МСП, здатних запропонувати інноваційні рішення в сфері «розумних» мереж, переробки відходів, альтернативної енергетики та екологічного моніторингу.

Живі приклади:

У Львові комунальне сміттєспалювальне підприємство запустило модуль із виробництва електроенергії з біогазу - тепер міські автобуси частково їздять «на смітті».

На Житомирщині постраждалий від окупації агрохолдинг замінив старі зерносушарки на теплові насоси, скоротивши споживання газу на 70%.

У Харкові (там, де дозволяє безпекова ситуація) підприємці відновлюють котельні з когенераційними установками - це дає і тепло, і світло одночасно.

Справжня екологізація бізнесу тримається на двох рівноцінних складових. Перша - екологічний менеджмент: ресурсозбереження, комплексне використання сировини, пошук альтернативних джерел енергії всередині компанії. Друга - екологічний маркетинг: чесне екомаркування, формування позитивного іміджу, виховання свідомого споживача. Жоден із цих аспектів не працює окремо. Найбільшого ефекту досягають ті підприємці, які поєднують бережливе виробництво з активною комунікацією.

Сьогодні вся Україна має унікальний шанс. Руйнування - це болісна, але реальна можливість перезавантажити економіку за принципами циркулярності та низьковуглецевого розвитку. Головний висновок: «зелений бізнес» у нашій країні більше не є справою ентузіастів-одинаків. Він стає частиною офіційної політики, комунальних інвестпрограм і міжнародної допомоги.

Для підприємців це сигнал: час пропонувати екотехнології не абстрактній природі, а конкретним комунальним підприємствам та програмам відновлення. Вже зараз оголошено тендери на відновлення об'єктів «Укренерго» з обов'язковою вимогою встановлення систем моніторингу якості повітря та акумуляторних станцій. МСП, які мають сертифікати з енергоменеджменту (ISO 50001), отримують додаткові бали.

Зелене підприємництво - це не жертва, а стратегічна перевага. Той, хто впроваджує екостандарти першим, отримує лояльність клієнтів, менше регуляторних ризиків і доступ до нових ринків. Хто встигне першим, той і побу-

дує економіку майбутнього вже сьогодні — і залишить планету придатною для життя прийдешніх поколінь.

УДК 621.3:004.43:681.3
Коціло Д. О.[1], Кириленко С. М.[2]
[1] студ. гр. Е-274 НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. Е-214сп НУ «Запорізька політехніка»

ЧИННИКИ СТАРІННЯ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОЇ СТАЛІ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИНАХ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА РЕМОНТІ

Процеси старіння в електричних машинах (ЕМ) значною мірою визначаються станом електротехнічної сталі (ЕТС). Оскільки саме через ЕТС відбувається передавання енергії між статором і ротором, ігнорування її деградації є неприпустимим. У науково-технічній літературі цьому аспекту приділено найменше уваги. Причина криється в тому, що протягом періоду безвідмовної експлуатації ЕМ зміни параметрів сталі є незначними. Під коефіцієнтом старіння сталі розуміють відсоткове зростання питомих втрат (виміряних за індукції 1 Тл і частоти 50 Гц) після 600-годинного нагрівання осердь ЕМ до 1000°С. Відомо, що втрати в сталі змінюються під дією температури. Попри дослідження впливу нагрівання на магнітні властивості листової сталі [2, 3], природа цього явища остаточно не з'ясована. В електричній машині ми маємо справу з пакетом листів ЕТС, розділених ізоляційним шаром. Під час нагрівання цей шар може руйнуватися, утворюючи короткозамкнені контури між листами, що призводить до зростання втрат на вихрові струми.

На зміну магнітних властивостей ЕТС впливає також зношування підшипників. За значного зносу відбувається тертя ротора об статор, що спричиняє механічне пошкодження сталі обох осердь. Механічна деформація сталі, як відомо, погіршує її магнітні характеристики. Крім того, замикаються листки зубців осердя статора – найбільш вразливої ділянки, оскільки саме через зубці передається основна частина енергії від статора до ротора. Погіршення магнітних властивостей зубців спричиняє додаткове викривлення магнітного потоку в повітряному зазорі, його послаблення (вихрові струми генерують зустрічні потоки, що зменшують дію основного потоку), а також створює передумови для локального перегріву в зоні зубців через зростання втрат енергії, яка вже не може бути повністю відведена від машини. Сукупність цих чинників призводить до таких негативних наслідків, як пробій ізоляції поблизу сталі зубців і погіршення робочих параметрів ЕМ (зниження коефіцієнта корисної дії, обертового моменту тощо).

Слід зазначити, що в режимі нормальної роботи двигуна (до першого планового ремонту, за номінальної синусоїдної напруги) вплив описаних

факторів є несуттєвим – відбувається лише природне старіння машини. Однак за наявності в мережі перенапруг або несинусоїдності форми напруги процес старіння прискорюється. Наприклад, перенапруга змушує двигун працювати в режимі насичення, що збільшує втрати в сталі, породжує несинусоїдність споживаного струму та відповідного магнітного потоку. Наслідком є перегрівання ізоляції через зростання втрат у міді від первинного струму та втрат у сталі, а також зниження ККД і обертового моменту.

Суттєво впливає на старіння ЕМ і процес її ремонту, але не через недосконаліть технології, а через незворотні зміни в конструктивних елементах. Відомо, що після ремонту відремонтована машина споживає з мережі більший струм навіть у режимі неробочого ходу – його значення зростає на 20–40%. Детальний аналіз дає підстави стверджувати, що основні зміни в ЕМ пов'язані саме з ЕТС, оскільки вона зазнає найпотужніших теплових (до 450–700°С) і механічних (видалення обмотки з осердя) впливів під час ремонту.

Структура ЕТС – це конгломерат феритових зерен, у розчині яких містяться інші складові сталі. Оскільки ЕТС отримують прокаткою, її зерна дещо витягнуті в напрямку прокатки, що зумовлює анізотропію механічних, магнітних і електричних властивостей. Витягування зерен, як наслідок холодного наклепу, дещо погіршує магнітні характеристики та збільшує петлю гістерезису та призводить до зростання магнітних втрат [4]. Водночас наклеп підвищує електричний опір, дещо знижуючи втрати на вихрові струми, однак домінувальним чинником залишається збільшення площі петлі гістерезису. Вплив наклепу посилюється під час наступної механічної обробки (різання, штампування), яка також погіршує магнітні властивості матеріалу. Для компенсації впливу наклепу ЕТС після прокатки піддають відпалюванню, що сприяє укрупненню зерен і зменшенню втрат на гістерезис. Експериментально встановлено, що необхідний рівень магнітних властивостей досягається за температур 800...900°С та швидкостях нагрівання 10...50°С/с. Під час відпалювання, окрім рекристалізації та росту зерен, на поверхні листів формується тонка щільна оксидна плівка з необхідними значеннями електроопору.

Як відомо, сучасні сорти ЕТС легують невеликою кількістю кремнію, який виконує дві функції: по-перше, сприяє перетворенню вуглецю з цементиту на графіт, знижуючи втрати на гістерезис; по-друге, підвищує електричний опір сталі, зменшуючи втрати на вихрові струми. Передбачається [4], що позитивний ефект відпалювання зберігатиметься після штампування та різання на підприємстві, що й практикують деякі фірми. Для запобігання інтенсивному окисненню відпалювання в такому разі проводять у водневій атмосфері.

Цікаво, що кількості діоксиду кремнію (SiO_2), яка утворюється під час попереднього зневуглецьованого відпалювання, недостатньо для реакції з оксидом магнію (MgO), що додають під час отримання електроізоляційного

покриття. Решту SiO_2 (не менше 65%) утворюється на етапі високотемпературного відпалювання внаслідок окиснення кремнію парами води, що входять до складу гідратованого MgO. Отже, під час високотемпературного відпалювання електричні та магнітні властивості сталі практично не погіршуються. Однак, якщо розглянути процес зміни цих властивостей під час відпалювання при видаленні обмотки статора, можна зробити такі висновки:

Оскільки відпалювання відбувається на повітрі навіть за температур 300°С і вище відбувається зміна внутрішньої структури сталі: зерна продовжують рости, але водночас утворюється значна кількість цементиту, який погіршує магнітні властивості через виникнення внутрішніх напружень, що заважають повертанню доменних областей під дією зовнішнього поля. Це призводить до зменшення індукції насичення, зниження максимальної магнітної проникності тощо.

Знижується питомий опір у приповерхневих шарах сталі через зменшення концентрації кремнію в цих зонах унаслідок його участі в утворенні оксидної плівки. Це спричиняє зростання вихрових струмів і відповідних втрат.

В наслідок відпалювання та механічних пошкоджень порушується ізоляція між листами пакета ЕТС. Дослідження показують, що 15,83% зубців (саме в зубцях осердя статора відбуваються найбільші зміни) мають локальну відсутність міжлистової ізоляції, з них у 2,125% випадків пошкоджено два сусідні листки, а в 0,985% – три, що створює передумови для виникнення локального контуру. В осерді статора після ремонту налічується до 8–12 локальних контурів, які виникають через термообробку, механічні ушкодження та короткі замикання на ділянках ізоляції, прилеглих до осердя. Це є зонами локального перегріву через збільшення вихрових струмів. Слід зазначити, що, за даними, ізоляція з SiO_2 на цих ділянках не відновлюється під час відпалювання, на відміну від етапу складання осердя.

У всіх відремонтованих двигунів спостерігається розпушення крайніх листів осердя, причому їхня кількість значно більша з боку витягування обпаленої обмотки. Кількість ослаблених листів у пакетах асинхронних двигунів (АД) потужністю до 28 кВт сягає 8–15, а до 75 кВт – 20–25. Як відомо [4], додавання кремнію погіршує механічні властивості сталі. Якщо сталь марок 1211, 1212 (0,4–0,8% Si) завтовшки 0,5 мм витримує без пошкоджень 10 перегинів, то сталь марок 1511, 1512 такої самої товщини – лише один перегин. Тому механічні впливи під час ремонту можуть спричинити руйнування зубців сталі: за даними в АД потужністю до 75 кВт вищерблення в зубцях осердь спостерігаються в 75% випадків. Крім того, механічна деформація призводить до зниження магнітних властивостей сталі, зокрема індукції насичення, хоча під час відпалювання вона дещо підвищується.

Перед складанням вирубок в осердя на електромеханічних підприємствах для уникнення замикань між листами їх ізолюють емалевим лаком. Під дією тепла та механічних зусиль лак руйнується, що створює можливість замикання саме по краях листів, яке неможливо виявити експериментально, оскільки найнебезпечніше місце контакту – невеликі виступи по краю контуру після вирубки – має малу площу. Контакт між листами призводить до зростання вихрових струмів.

Отже, одним із найвагоміших чинників зміни властивостей сталі є зростання втрат від вихрових струмів, оскільки навіть суттєві зміни магнітних властивостей під час відпалювання (за температури нижче точки Кюрі) не можуть спричинити збільшення втрат у сталі на 239,4%.

Зміна якості основних конструкційних матеріалів – класу нагрівостійкості ізоляції, ЕТС, а також неспіввісність у підшипниках – призводить до суттєвих змін у самих ЕМ. Ці зміни необхідно контролювати з високою точністю, ретельно оцінювати та документувати з метою визначення реальних параметрів АД у процесі їхнього старіння внаслідок ремонту та експлуатації, що допоможе збільшити термін їхньої служби та знизити загальні витрати підприємства на ремонт.

УДК 621.3:004.43:681.3
Коптєв В.М.[1], Бредун С.М.[2]
[1]студ. гр. Е-214 НУ «Запорізька політехніка»
[2]студ. гр. Е-214сп НУ «Запорізька політехніка»

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ БЕЗПЕРЕРВНОГО МОНІТОРІНГУ СИЛОВИХ МАСЛЯНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

Силові трансформатори високих класів напруги належать до найбільш критичних та вартісних компонентів енергосистем, що забезпечують генерацію, передачу та розподіл електроенергії. Останніми роками проблема контролю та оцінки їхнього технічного стану набула особливої гостроти. Головна причина - поступове старіння парку такого обладнання. На сьогодні на генеруючих і мережевих підприємствах частка трансформаторів, які експлуатуються понад нормативний ресурс, у середньому перевищує 60%, а в окремих випадках сягає 96%, і цей показник має стійку тенденцію до зростання. Така ситуація зумовлена комплексом факторів. У період інтенсивного енергетичного будівництва 1965–1990 років було введено в експлуатацію величезну кількість трансформаторів. Нині ці пристрої вже вичерпали нормативний ресурс, однак заміна їх на нові є економічно та виробничо недоцільною, оскільки фізичний потенціал більшості з них залишається значним. Водночас

експлуатація трансформаторів із тривалим терміном служби має свої суттєві особливості.

Аналіз аварійності силових трансформаторів свідчить, що безпосередньо з вичерпанням фізичного ресурсу пов'язано лише 7–20% відмов (за різними оцінками). Решта відмов спричинені виникненням і розвитком різноманітних дефектів, більшість яких за умов своєчасного виявлення можна було б усунути. Отже, головне завдання при експлуатації трансформаторів - якомога раніше виявляти дефекти, що зароджуються, на початкових стадіях їх розвитку. Для трансформаторів зі строком експлуатації меншим від нормативного, характерна переважна більшість (близько 75%) так званих повільно прогресуючих дефектів, які розвиваються роками. Саме під них і була розрахована традиційна система періодичного контролю. Однак існують також дефекти, що прогресують за кілька місяців, а також ті, що призводять до раптових відмов за лічені дні або навіть години. Періодичний контроль практично не здатний вчасно виявити такі аномалії, але їхня частка не перевищує 25%.

Зі збільшенням терміну експлуатації частка швидкорозвивних дефектів і раптових відмов зростає. Для трансформаторів із терміном служби понад 30 років співвідношення виглядає приблизно так: 40% - повільно прогресуючі дефекти, 40% - швидкорозвивні, 20% - раптові відмови. Очевидно, що для таких об'єктів існуюча система періодичного контролю є незадовільною.

Для трансформаторів класів напруги 110 кВ і вище найбільш небезпечні (катастрофічні) відмови, що призводять до утилізації або капітального ремонту, пов'язані переважно з пошкодженням ізоляції. Для надійного виявлення дефектів ізоляції досить контролювати порівняно невелику групу параметрів: електричну міцність масла, вміст розчинених у маслі газів, діелектричні характеристики головної ізоляції високовольтних вводів, а також часткові розряди в головній ізоляції та ізоляції вводів. Прямий вимір електричної міцності масла є технічно складним, тому на практиці оцінюють параметри, що її визначають: появу емульгованої вологи та механічних домішок. Домішки виявляють фотометричним методом, а емульговану вологу - прямим вимірюванням точки роси або опосередковано через вологість твердої ізоляції та температуру.

Потужніші трансформатори можуть оснащуватися додатковими вимірювальними каналами, що підвищують зручність експлуатації та дають змогу регулювати залишковий ресурс. До таких параметрів належать вібрація, параметр Zк, стан пристроїв РПН, контроль і керування системою охолодження тощо. Вартість таких систем на порядок і більше перевищує вартість найпростіших, тому їхнє економічне застосування виправдане для трансформаторів потужністю від 400 тис. кВА.

Окрему категорію становлять системи, призначені для дослідження процесів, що відбуваються в трансформаторах під час експлуатації, з метою

вдосконалення конструкції та оптимізації робочих режимів. Такі системи насамперед цікавлять виробників. Вони є найдорожчими й додатково включають контроль розподілу температури вздовж обмотки, стан магнітної системи, зміну геометрії обмоток, потужніші вимірювачі характеристик часткових розрядів тощо. На жаль, поки що подібні комплекси пропонують переважно зарубіжні виробники. Вони не лише збирають інформацію про апарат, а й керують його режимами, фіксують історію роботи, прогнозують залишковий ресурс, виконують допоміжні функції.

Варто відзначити негативну тенденцію, яка спостерігається при впровадженні систем безперервного моніторингу. Як показано вище, найбільше такі системи потрібні «старим» трансформаторам. Однак ними сьогодні оснащують переважно нові трансформатори, для яких вони стануть актуальними лише через 20–30 років. Це, ймовірно, пов’язано з організаційними особливостями фінансування: виділити кошти при купівлі нового обладнання простіше, ніж на підтримку експлуатації старого. Така практика, на думку авторів, є хибною, і її необхідно змінювати.

Отже, основним завданням для забезпечення надійної роботи парку силових трансформаторів слід вважати широке впровадження найпростіших і найдешевших систем безперервного контролю на максимальній кількості «старих» трансформаторів. Водночас для найпотужніших і найвідповідальніших агрегатів доцільно використовувати системи з розширеними функціями.

УДК 621.3:004.43:681.3
Табачук В.М.[1], Гарбут С.О. [2]
[1] студ. гр. Е-215 НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. Е-264сп НУ «Запорізька політехніка»

ВПЛИВ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОГО СТАРІННЯ ТА РЕМОНТНИХ ВТРУЧАНЬ НА РОБОЧІ ПАРАМЕТРИ ЕЛЕКТРИЧНИХМАШИН (НА ПРИКЛАДІ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ)

У процесі експлуатації електричних машин відбувається поступова зміна їхніх параметрів, зумовлена явищем старіння. У науково-технічній літературі це поняття не набуло широкого розповсюдження через труднощі його точного формалізованого опису. По суті, старіння стосовно електричних машин – це часткова або повна втрата основними конструкційними матеріалами та вузлами своїх первісних властивостей під дією зовнішніх чинників, що виникають під час експлуатації та ремонтів з плином часу. Отже, процес старіння безпосередньо пов'язаний із надійністю, оскільки зі збільшенням ступеня старіння скорочується середній наробіток на відмову.

Розглядаючи старіння, не можна ігнорувати жоден з елементів машини: механічні вузли (підшипники, вали тощо), магнітні матеріали сердечників або обмотувальні вироби. Зміна властивостей будь-якої складової неминуче впливає на робочі параметри. Наприклад, зношування підшипників спричиняє зсув вала, через що повітряний зазор стає нерівномірним. Це, з одного боку, призводить до вібрацій, а з іншого – створює передумови для механічного пошкодження магнітних матеріалів (зачіпання листів статора обертовим ротором).

Повна оцінка старіння всіх конструктивних елементів є надто трудомісткою, однак у практичній експлуатації достатньо відповісти на два ключові питання: як збільшити час безвідмовної роботи електричної машини після ремонту; як змінюються робочі параметри машини в процесі старіння та після ремонтних впливів.

Відповіді можна отримати, зосередившись на аналізі старіння тих вузлів, відмови яких становлять основну частку відказів. Проведемо такий аналіз для асинхронних двигунів (АД). Згідно з даними [1], 85–95% виходів з ладу АД пов'язані з пошкодженням обмотки статора. При цьому розподіл відмов такий: міжвиткові замикання – 93%, пробій міжфазної ізоляції – 2%. На підшипниковий вузол припадає 5–8% відмов, а решта – на розпаювання виводів, скручування валів, обрив стрижнів ротора тощо.

Отже, старіння машини визначається головним чином старінням ізоляції та підшипникових вузлів. Розглянемо ці процеси детальніше.

Аналіз факторів, що впливають на старіння ізоляції [1], дозволяє виділити два основні: температурний та механічний впливи. Після ремонту електричної машини дія цих факторів посилюється через такі особливості:

– часто за відсутності потрібного типу ізоляції використовують наявну, що знижує нагрівостійкість;

– при заміні підшипників нерідко виникає ексцентриситет вала, який підвищує рівень вібрації.

Старіння підшипникових вузлів варто розглядати в кількох аспектах. По-перше, це друга за частотою причина відмов. По-друге, старіння підшипників породжує вібрації в широкому діапазоні частот. По-третє, нерівномірність повітряного зазору, що виникає при старінні, призводить до локального перегріву обмотки статора АД.

Низькочастотна вібрація негативно впливає на ізоляцію. Окрім недосконалості підшипників кочення та порушення геометрії пари «шип–підшипник», причинами вібрацій є ексцентриситет і неврівноваженість обертових мас. Ці джерела вібрації виникають під дією електромагнітних, аеродинамічних та механічних сил. Електромагнітні сили залежать від співвідношення числа пазів ротора й статора, параметрів магнітного кола, нерівномірності зазору, несиметрії напруги живлення тощо [2]. Аеродинамічні сили

зумовлені конструкцією вентилятора та вентиляційних каналів [3]. Механічні сили визначаються якістю виготовлення підшипників, точністю обробки посадкових місць і величиною дисбалансу ротора. Дисбаланс виникає через технологічні відхилення, прогин вала, температурні деформації, неоднорідність матеріалу обертових частин. Таким чином, у процесі природного старіння, а особливо після ремонту, електромагнітні й механічні сили зростають через деградацію конструкційних матеріалів та вузлів.

Істотний внесок у старіння електричної машини робить деградація електротехнічної сталі (ЕТС). Оскільки саме через ЕТС відбувається передача енергії від статора до ротора, ігнорувати цей процес неможливо. У літературі йому приділяється найменше уваги, тому що в період нормальної експлуатації зміна параметрів сталі незначна. Під коефіцієнтом старіння сталі розуміють відсоткове збільшення питомих втрат (виміряних при індукції 1 Тл і частоті 50 Гц) після 600-годинного нагрівання сердечника до 1000°С [4]. Відомо, що при нагріванні втрати в сталі змінюються, але точні механізми до кінця не з'ясовані, хоча вплив нагрівання на магнітні властивості вивчений [5, 6]. В електричній машині ми маємо пакет листів ЕТС, між якими є ізоляційне покриття. При нагріванні це покриття може руйнуватися, створюючи короткозамкнені контури між листами, що збільшує втрати на вихрові струми. На зміну магнітних властивостей ЕТС впливає також зношування підшипників. При значному зносі відбувається тертя ротора об статор, що призводить до механічного пошкодження сталі обох сердечників. Механічна деформація сталі погіршує її магнітні характеристики [5, 6]. Крім того, замикаються накоротко листи зубців статора – найбільш вразливого місця, оскільки саме через зубці передається основна частина енергії. Погіршення магнітних властивостей зубців викликає додаткове спотворення магнітного потоку в повітряному зазорі, його ослаблення (вихрові струми створюють зустрічні потоки, що послаблюють основний потік), а також локальне перегрівання зони зубців через збільшення втрат, які не можуть бути повністю відведені. Сукупність цих факторів призводить до пробою ізоляції поблизу зубців і погіршення робочих параметрів (зниження ККД, обертального моменту тощо).

Варто зазначити, що в нормальному режимі (до першого ремонту, при синусоїдальній номінальній напрузі) вплив описаних факторів незначний – відбувається природне старіння. Однак при виникненні перенапруг або несинусоїдальності напруги живлення процес старіння прискорюється. Наприклад, перенапруга переводить двигун у режим насичення, що збільшує втрати в сталі, породжує несинусоїдальний струм та магнітний потік. Наслідком є перегрів ізоляції через зростання втрат у міді та сталі, зниження ККД і моменту.

Значний вплив на старіння має ремонт, причому не стільки через недосконалість технології, скільки через серйозні зміни конструктивних елементів.

Відомо, що після ремонту двигун споживає на 20–40% більший струм навіть у режимі холостого ходу. Детальний аналіз показує, що основні зміни пов'язані з електротехнічною сталлю, оскільки саме вона зазнає найпотужніших теплових (до 450–700°C) і механічних (видалення обмотки) впливів під час ремонту.

Зміна якості конструкційних матеріалів (класу нагрівостійкості ізоляції, властивостей ЕТС) та порушення співвісності в підшипниках призводять до суттєвих змін робочих параметрів. Ці зміни необхідно визначати з високою точністю, ретельно оцінювати та документувати, щоб встановити реальні параметри АД у процесі старіння внаслідок експлуатації та ремонтів. Це допоможе збільшити термін служби машин і знизити загальні витрати підприємства на ремонт.

Отже, основні чинники старіння – деградація ізоляції обмоток (93% відмов через міжвиткові замикання) та зношування підшипникових вузлів (5–8% відмов). Саме вони визначають зміну робочих параметрів електричних машин у часі.

Вплив ремонту – післяремонтні зміни (заміна ізоляції на менш стійку, ексцентриситет вала, теплова та механічна дія на електротехнічну сталь) призводять до зростання струму неробочого ходу на 20–40% та погіршення енергетичних показників.

Роль електротехнічної сталі – руйнування міжлистової ізоляції при нагріванні та механічне пошкодження зубців (внаслідок тертя ротора об статор) збільшують втрати на вихрові струми, спотворюють магнітний потік і спричиняють локальний перегрів.

Вплив якості живлення – перенапруги та несинусоїдальність напруги прискорюють старіння через перехід у режим насичення, зростання втрат у сталі та міді, зниження ККД і моменту.

Практична рекомендація – для підвищення надійності після ремонту необхідно документувати зміни параметрів (струм холостого ходу, втрати, вібрацію) та враховувати реальний стан електротехнічної сталі та ізоляції.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Прус В. В., Дегтяренко О. О., Сьомка О. О. Уточнення стану магнітних систем синхронних машин шляхом відеоідентифікації поверхні зубців. Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал. Кременчук: КрНУ, 2020. Вип. 3/2020 (51), С. 34–39.

2. Zagirnyak M., Prus V., Somka O., Dolezel I. Models of reliability prediction of electric machine taking inTo account the state of major structural units, Advances in Electrical and Electronic Engineering 13(5), pp. 447-452 (2015).

3. Almashakbeh A.S., Prus V., Zagirnyak M. Models for electric machine reliability prediction at variation of the condition of basic structural units, Przeglad Elektrotechniczny 93(1), pp. 117-120 (2017).

4. Zagirnyak, D. Rodkin, T. Korenkova, "Estimation of energy conversion processes in an electromechanical complex with the use of instantaneous power method", 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition, PEMC 2014, pp. 238-245, 2014, DOI: 10.1109/EPEPEMC.2014.6980719.

5. Prus V. “The alteration of the energy parameters and losses components of electric machines in the process of their aging,” Proceedings of the International Conference on Modern Electrical and Energy Systems, MEES 2017, 2018-January, pp. 44-47 (2017), DOI: 10.1109/MEES.2017.8248948.

6. Zagirnyak M., Prus V., Kolotylo I., Miljavec D. Determination of power indices for a three-phase induction motor with a phase-wound rotor through particular losses components, Przeglad Elektrotechniczny 88(12 B), pp. 80-82 (2012).

СЕКЦІЯ «ЕЛЕКТРИЧНІ ТА ЕЛЕКТРОННІ АПАРАТИ»

УДК 621.313.333
Hizenko M.[1], Lukash D.[1], Kotsur M.[2]
[1] PhD student, National University «Zaporizhzhia Polytechnic»
[2] assistant professor, National University «Zaporizhzhia Polytechnic»

DEVELOPMENT AND ENHANCEMENT OF MATHEMATICAL MODELS OF INTERCONNECTED AC ELECTROMECHANICAL CONVERTERS ON A COMMON SHAFT

In modern industrial complexes and autonomous power supply systems, multi-machine units, where several AC electromechanical converters are connected by a single mechanical shaft (for example, «motor-generator» systems or multi-motor electric drives), have become widespread. The study of such complexes is complicated by the presence of cross-electromagnetic and electromechanical couplings. The use of classical linear models of individual machines does not allow estimating with sufficient accuracy the influence of elastic shaft line oscillations, the effects of magnetic system saturation, and mutual energy exchange in dynamic modes. Therefore, the enhancement of the mathematical apparatus for the comprehensive description of such objects is a relevant scientific and technical task.

Traditional approaches to modeling isolated electrical machines do not fully account for the mutual influence of converters connected by a rigid or elastic mechanical link. The enhancement of the mathematical apparatus in this case is based on integrating the differential equations of the electromagnetic state of each individual machine with a single equation of motion for a multi-mass electromechanical system. The use of refined T-equivalent circuits for AC converters creates a basis for the correct consideration of non-linearities, in particular, the effects of magnetic core saturation by the main magnetic flux and current displacement in the rotor bars.

By applying dynamic modeling methods in the MATLAB/Simulink environment, it becomes possible to investigate complex transient processes with high detailing of currents, torques, and speeds. An important stage in the development of the mathematical description is the creation of hybrid circuit-field models, which successfully combine the computational speed of macromodels with the accuracy of analyzing the spatio-temporal field distribution. Such a comprehensive approach allows for an adequate assessment of the system's behavior during heavy starts, synchronization processes, or sudden load applications on the actuating mechanism. The developed models serve as a powerful tool for optimizing the energy characteristics of the entire electromechanical complex. An in-depth analysis of the power loss components in both converters forms a scientific foundation for finding loss minimums (energy «wells») depending on the current slip and

control parameters, which is a critically important aspect for increasing the overall efficiency of the interconnected system.

The enhancement of mathematical models for AC electromechanical converters connected by a common shaft allows transitioning from approximate estimates to the precise forecasting of the dynamics of complex units. The application of refined equivalent circuits and simulation modeling tools in the MATLAB/Simulink environment provides a deep understanding of the physics of interconnected processes. The obtained mathematical models serve as an effective basis for designing energy-saving control algorithms aimed at minimizing total power losses in the electromechanical system.

УДК 621.311
Жорняк Л.Б.[1], Бахметьєв В.В.[2]
[1] доц. НУ «Запорізька політехніка»
[2] асп. НУ «Запорізька політехніка»

ОЦІНКА ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ 10–35 КВ В УМОВАХ НАВАНТАЖЕННЯ ЕНЕРГОСИСТЕМИ

Мережі розподілу електроенергії напругою 10–35 кВ виконують важливу функцію передачі електроенергії від магістральних мереж до кінцевих споживачів, виступаючи проміжною ланкою між високовольтними та низьковольтними рівнями. Вони охоплюють значну частину території країни, забезпечуючи електропостачання міських і сільських районів, і становлять близько третини загальної довжини електричних мереж України [1]. Структурно ці мережі представлені переважно повітряними лініями, частка яких перевищує 80 %, тоді як кабельні лінії більш поширені у великих містах. Така конфігурація обумовлює різні умови експлуатації та рівень надійності в залежності від регіону і типу мережі.

Аналіз технічного стану показує, що значна частина обладнання працює понад нормативний строк служби. Середній рівень фізичного зносу повітряних ліній 10–35 кВ становить 45–60 %, кабельних – до 40 %, а трансформаторного обладнання – до 45 % і більше. Вікова структура також свідчить про старіння інфраструктури: переважають елементи з терміном експлуатації понад 20 років, що підвищує ймовірність відмов і аварійних ситуацій [2].

Експлуатаційні показники мереж залишаються відносно низькими у порівнянні з європейськими стандартами. Зокрема, технічні втрати електроенергії в мережах 10–35 кВ становлять у середньому 6–8 %, показники надійності характеризуються значною кількістю перерв в електропостачанні. Щорічно фіксуються тисячі аварій, основними причинами яких є пошкодження ліній, зношеність ізоляції та конструктивних елементів.

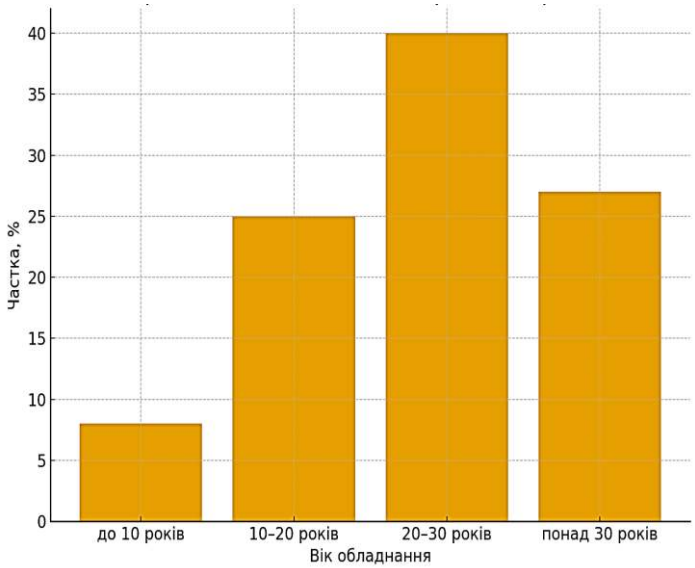


Рисунок 1 – Віковий розподіл обладнання мережі 10–35 кВ

Стан мереж є нерівномірним у регіональному розрізі: у промислових і міських районах обладнання частково оновлювалося, тоді як у сільській місцевості переважають застарілі повітряні лінії. Це ускладнює управління режимами роботи енергосистеми та впливає на стабільність електропостачання. Суттєвим фактором впливу на функціонування мереж стала повномасштабна війна, що призвела до значних пошкоджень об'єктів електроенергетичної інфраструктури. Руйнування підстанцій і ліній, ускладнення доступу до об'єктів, збільшення тривалості ремонтних робіт негативно позначилися на надійності електропостачання. Додатково ситуацію ускладнюють зміни режимів споживання та дефіцит генеруючих потужностей [3].

Таким чином, мережі 10–35 кВ функціонують в умовах підвищеного навантаження та обмежених ресурсів, що проявляється у зростанні аварійності, втрат електроенергії та зниженні показників надійності. Їхній поточний стан визначається як сукупністю накопичених технічних проблем, так і впливом зовнішніх факторів, що потребує постійного контролю та аналізу експлуатаційних характеристик.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Бахметьєв В. В., Левченко О. П., Жорняк Л. Б. Підвищення ефективності роботи розподільчих мереж ліній 10–35 кВ за рахунок автоматичних пунктів секціонування. Електроенергетика, електромеханіка та технології в

АПК : тези доп. міжнар. наук.-практ. конф. (Харків, 6 листоп. 2024 р.). Харків : Держ. біотехнологічний ун-т, 2024. С. 16–17.

2. Жорняк Л. Б., Бахметьєв В. В. Аналіз стану розподільчих мереж 10–35 кВ в загальній енергосистемі України. *Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит*. 2025. Т. 212, № 9. С. 4–16. URL: https://doi.org/10.20998/2313-8890.2025.09.01 (дата звернення: 23.03.2026).

3. Левченко О. П., Семчишина Ю. О. Дослідження шляхів підвищення надійності роботи електромережевого господарства АПК України у сучасних умовах життя. Електроенергетика, електромеханіка та технології в АПК : тези доп. міжнар. наук.-практ. конф. (Харків, 9 листоп. 2023 р.). Харків : Держ. біотехнологічний ун-т, 2023. С. 21–22.

УДК 621.313.333

Klishchevskyi O.[1], Kotsur M.[2]
[1] PhD student, National University «Zaporizhzhia Polytechnic»
[2] assistant professor, National University «Zaporizhzhia Polytechnic»

FEATURES OF THE OPERATING MODES OF A SYNCHRONOUS GENERATOR WITH COMBINED WINDINGS

In the current context of developing autonomous power supply systems and distributed generation complexes, issues of improving the quality of generated electricity, energy efficiency, and the static stability of electrical machines are of critical importance. The use of traditional synchronous generators (SGs) with non-linear and asymmetrical loads is accompanied by the distortion of the output voltage waveform and the occurrence of additional losses from higher spatial and temporal harmonics. The application of synchronous generators with combined windings (SGCWs) on the stator is a highly effective circuit design solution that significantly improves the harmonic composition of the magnetomotive force (MMF), reduces the size and weight of the machine, and increases its stability in transient modes, particularly during grid synchronization.

A comprehensive analysis of the steady-state and transient operating modes of a synchronous generator with combined windings to evaluate its electromechanical characteristics, power quality indicators, and dynamic stability during synchronization and load variations.

The specific operation of SGCWs is determined by the special configuration of the stator circuit, which typically consists of two three-phase winding systems spatially shifted relative to each other (e.g., by 30 electrical degrees) and connected in a «star-delta» or similar multiphase configurations.

An in-depth analysis of the operating modes of such a generator highlights the following key features:

– due to the spatial shift and electromagnetic coupling between the sections of the combined winding, mutual compensation of the spectrum of higher harmonics (primarily the most pronounced 5th and 7th harmonics) occurs in the stator MMF waveform. This leads to a significant improvement in the output voltage waveform (reduction of the total harmonic distortion, THD) even when operating with rectifier or rapidly fluctuating loads. Stator differential leakage is reduced, contributing to a decrease in additional iron losses and an increase in the overall efficiency of the machine;

– the presence of combined structures creates specific damping properties in the stator circuit. During exact synchronization or self-synchronization, SGCWs demonstrate a reduction in the amplitudes of peak transient currents and electromagnetic torques. The conditions for pulling the generator into synchronism are improved due to a stiffer electromechanical coupling and the smoothing of torque pulsations, which is critically important for ensuring the stability of local power grids;

– when load current asymmetry occurs, the combined winding creates an effect of redistributing zero- and negative-sequence currents. This reduces the heating of the solid parts of the rotor and the damper system caused by negative-sequence currents, expanding the permissible asymmetry range without the need to derate the generator's nominal power.

The analysis of the operational features of an SGCW proves its undeniable advantages over machines of classical design. By suppressing the higher harmonic components of the stator MMF, the generation of voltage with high-quality indicators is ensured. The circuit integration of the windings increases the dynamic stability of the machine during synchronization and damps the negative consequences of asymmetrical modes. Further research should be directed towards the development of detailed field and circuit mathematical models (e.g., in the MATLAB/Simulink environment) to optimize the parameters of combined windings for the specific requirements of autonomous power complexes.

УДК 621.313.333

Lukash D.[1], Hizenko M.[1], Kotsur M.[2]
[1] PhD student, National University «Zaporizhzhia Polytechnic»
[2] assistant professor, National University «Zaporizhzhia Polytechnic»

APPLICATION OF POLAR COORDINATES IN MATHEMATICAL MODELS OF AC ELECTROMECHANICAL CONVERTERS

The classical theory of a generalized electrical machine traditionally operates with the projections of space vectors of currents, voltages, and flux linkages onto rigidly defined Cartesian axes of orthogonal reference frames. However, given the

development of modern vector control systems and the need to ensure high energy efficiency indicators, such an approach complicates the physical interpretation of the rotation processes of electromagnetic fields. The application of polar coordinates, where the main state variables are the moduli of space vectors and their angular positions, is a highly relevant direction for improving mathematical models. This makes it possible to directly analyze amplitude-phase relationships and synthesize control algorithms focused on minimizing electrical losses in dynamic modes.

The transition from a Cartesian to a polar coordinate system in the mathematical description of AC converters fundamentally changes the structure of the differential equations for electromechanical energy conversion. Instead of operating with orthogonal projections (for example, along the d and q axes), the dynamic equations are divided into two functionally independent groups: components responsible for forming the magnetic flux amplitude (vector modulus) and components determining its instantaneous angular velocity of rotation (the derivative of the spatial angle). In a spatial modeling environment, particularly when creating complex simulation models in MATLAB/Simulink, this approach significantly simplifies the synthesis and tuning of control loops. It provides a clear visualization of the hodographs of space vectors, which is critically important for evaluating the quality of transient processes and predicting the effects of local magnetic core saturation. The mathematical representation of the machine's electromagnetic torque in polar coordinates holds particular scientific value. The expression for the torque takes the form:

$$M = \frac{3}{2} \cdot p_n \cdot \frac{L_m}{L_r} \cdot \Psi_r \cdot i_s \cdot \sin(\Theta),$$

where p_n is the number of pole pairs; Ψ_r and i_s are the modules of the rotor flux linkage and stator current space vectors, respectively; and Θ is the spatial angle between them.

This equation reveals direct mechanisms of influence on the energy efficiency of the electromechanical converter. Maintaining an optimal spatial angle Θ in any dynamic operating mode allows for maximizing the specific electromagnetic torque per ampere of stator current, which automatically leads to the minimization of thermal losses and an increase in the overall efficiency of the system.

The application of polar coordinates in the mathematical models of AC electromechanical converters is an effective tool for an in-depth analysis and optimization of electromagnetic processes. The separation of variables into amplitude and phase components ensures the physical transparency of the models and significantly simplifies the development of energy-saving control algorithms. The implemen-

tation of such models creates a solid scientific foundation for finding energy optimums and increasing the dynamic stability of electromechanical systems.

УДК 621. 315.626
Жорняк Л. Б.[1], Щусь В. М.[2]
[1] доц. НУ «Запорізька політехніка»
[2] асп. НУ «Запорізька політехніка»

МЕТОД ЗНИЖЕННЯ ІНТЕНСИВНОСТІ ЧАСТКОВИХ РОЗРЯДІВ У КОНДЕНСАТОРНІЙ ІЗОЛЯЦІЇ ТРАНСФОРМАТОРІВ СТРУМУ КЛАСУ НАПРУГИ 110-330 КВ

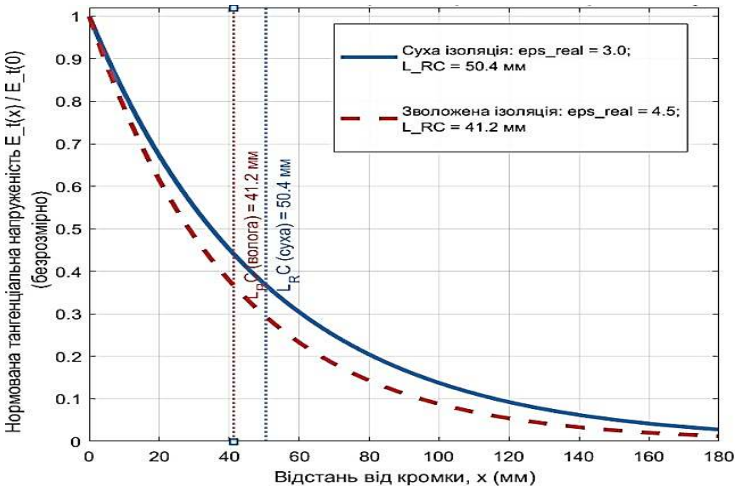
Експлуатаційна надійність конденсаторної ізоляції трансформаторів типу ТОМ визначається граничними станами локальної напруженості поля поблизу кромок фольгових електродів і перфорації манжет, де через геометричні та матеріальні неоднорідності формується різко неоднорідне поле та запускаються часткові розряди (ЧР). У класичних маслопаперових системах відсутній внутрішній механізм швидкого зниження крайових максимумів E у фазі фронту напруги, що призводить до росту tgδ, вуглецевих доріжок та зниження електричної міцності. Інтеграція тонкого напівпровідного шару з контрольованим Rs по контуру кромок створює керовану RC-лінію уздовж поверхні діелектрика, яка перерозподіляє потенціал у приповерхневій області та забезпечує експоненційне згасання поля, тоді як варисторна відповідь ZnO активується при $E \geq Eкр$ і відводить частину енергії імпульсу без формування стійкого плазмового каналу; такий підхід узгоджений із практикою PD-діагностики та проєктування згідно з IEC/IEEE і може бути впроваджений у виробництві як технологія «проклейки кромок» з нормованими параметрами шару.

$$E_b(x) = E_0 e^{-x\sqrt{\frac{wR_s\varepsilon_0\varepsilon}{2h_d}}},$$

де $E_b(x)$ – тангенціальна напруженість електричного поля на виході напівпровідного шару на відстані x від початку проклейки, В/м; E_0 – початкова напруженість поля на кромці без затухання, В/м; $\omega = 2\pi f$ – кругова частота прикладеної напруги, рад/с;R_s – листовий опір шару, одиниця вимірювання – Ом/кВ; ε_0 – електрична стала, Ф/м; ε – відносна діелектрична проникність підкладки під шаром; h_d – еквівалентна товщина діелектрика між шаром і протиелектродом, м; x – довжина проклейки кромки, м.



а



б

а – вузол кромки обкладки з напівпровідним шаром, геометрія дифузія потенціалу, зона згасання за формулою;
б – експоненційне згасання E = t (x) вздовж напівпровідникової проклейки, вплив дійсної відносної діелектричної проникності при сталому Rs
Рисунок 1 – Вузол кромки обкладки/манжети з напівпровідним шаром: геометрія x, hd, δ; напрямок дифузії потенціалу; зона згасання напруженості за формулою; позначення трійної точки «Al - шар-масло/папір»

Ця залежність є розв'язанням одновимірної квазістатичної моделі розподіленої RC-лінії поверхневого струму, де постійна згасання визначається добутком R_s та місткості ділянки $\varepsilon_0\varepsilon/h_d$; зменшення R_s у межах 10^8-10^9 Ом/кВ або збільшення довжини проклейки x дає кратне зниження $E_b(x)$, що безпосередньо підвищує напругу початку поверхневих ЧР U_{pd} у термінах IEC 60270,

одночасно не збільшуючи струм витоку понад допустимі значення згідно з IEC 60060-1. Нелінійна провідність ZnO локально зменшує ефективний бар'єр на межзернових контактах і за умови E та $E_{кр}$ переводить систему тему в режим відводу імпульсного заряду без стійкого пробою, що зменшує енергетичну щільність $W_{pd} = ½ \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon' \cdot E^2$ у критичних точках.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Жорняк Л. Б., Афанасьєв О. І., Щусь В. М. Оптимізація системи внутрішнього екранування в газонаповнених високовольтних електричних апаратах із полімерною ізоляцією. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика*. 2022. № 1 (7). С. 8–12.

УДК 621.316

Жорняк Л. Б., Левченко О. П.[2]
[1] доц. НУ «Запорізька політехніка»
[2] асп. НУ «Запорізька політехніка»

ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК АЕС ПРИ «ДАЛЬНЬОМУ РЕЗЕРВУВАННІ»

Безперебійна робота електроустаткування можлива тільки за наявності захисних пристроїв, що реагують на порушення нормальної роботи електроустановок і вчасно відключають пошкоджені елементи від неушкоджених. Для цих цілей служать автоматичні вимикачі, що широко використовуються як у міських електричних мережах, так і в електроустановках промислових підприємств. Висока чутливість автоматичних вимикачів дозволяє визначати аварійні режими на ранній стадії виникнення, обмежувати до мінімуму аварійний струм і викликане ним теплове, електродинамічне та інші небажані види впливу. Тим самим забезпечується цілісність енергосистеми, і зводяться до мінімуму наслідки аварії – неприпустимі простої електрообладнання, порушення технологічного циклу тощо.

Підвищення надійності захисту електричних мереж напругою 0,4 кВ вважається актуальною проблемою внаслідок того, що автоматичні вимикачі, що знаходяться в експлуатації і встановлені в існуючі мережі, в більшості випадків не відповідають сучасним вимогам надійності, як за кількістю реалізованих захистів, так і за показниками без показників. Розширення захисних функцій і підвищення надійності можливе за рахунок нових перспективних технологій, до яких відносяться мікропроцесорні пристрої, що застосовуються для розширеного аналізу аварійних процесів при розподілі потужно-

сті від атомних електричних станцій (АЕС) по основним перетіканням енергосистем країни [1]. Для електрообладнання АЕС в цілому і, зокрема, для електроустановок власних потреб (СН) напругою 0,4 кВ найбільш актуальним є підвищення показників надійності захисту та за рахунок цього зниження ймовірності виникнення пожежі в таких установках, що, у свою чергу, призводить до більш жорстких вимог до систем їх захисту [2].

На рис. 1 наведена захисна часткова характеристика автоматичного вимикача, що працює спільно з мікропроцесорним пристроєм захисту (МУЗ), що отримана в результаті модернізації авторами [2].

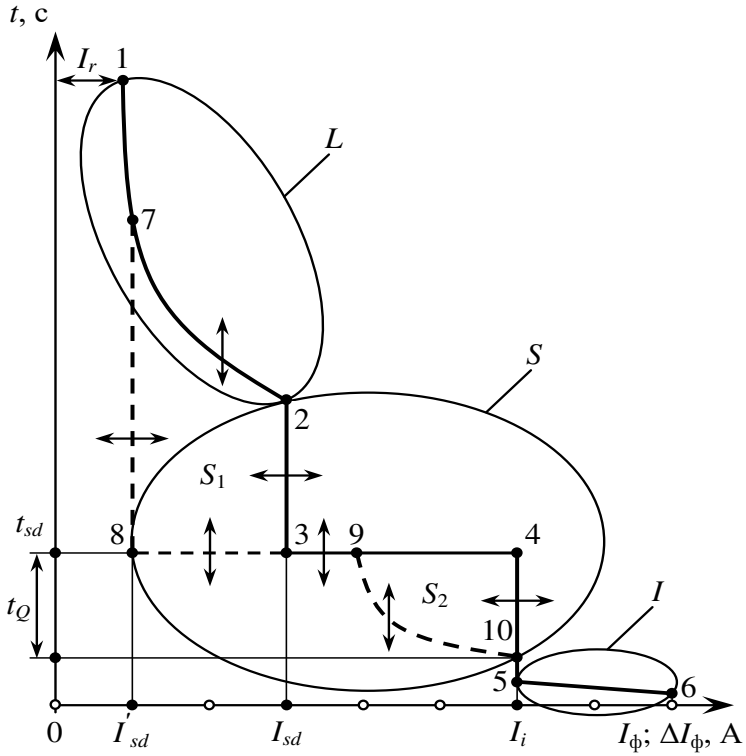


Рисунок 1 – Часо-струмова захисна характеристика вимикача, що працює спільно з МУЗ після модернізації: *L* – захист зони навантаження; *S* – захист зони КЗ; S_1 – захист від віддаленого КЗ або резервування; S_2 – швидкодіючий інтегральний селективний захист; *I* – захист у зоні «відсікання»

Суцільними лініями показані захисні характеристики, що формуються самим апаратом. Пунктирними лініями показані захисні характеристики, що ілюструють роботу МУЗ. Струмова уставка Isd, що вибирається за умовою

пуску ЕД, доповнюється меншою за величиною уставкою I'sd, що забезпечує високу чутливість до струмів КЗ. До модернізації перехід від зони навантаження до зони КЗ відбувався траєкторією 2-3. У новому захисті зазначений перехід, залежно від причини обурення ланцюга, може відбуватися як по лінії 2-3 (уставка Isd), так і по траєкторії 2-7-8 (уставка I'sd). Спрацьовування захисту може відбуватися в момент часу, що визначається як звичайною тимчасовою уставкою tsd, так і «інтегральної» Qsd, тому час спрацьовування при великих струмах КЗ істотно знижується. Це робить новий захист швидкодіючим і високочутливим до струмів КЗ. Модернізація електроустановок СН-0,4 кВ АЕС за рахунок застосування мікропроцесорних пристроїв з новими видами захисту потребуватиме значно менших часових і фінансових витрат в порівнянні з іншими варіантами модернізації, в тому числі і за рахунок застосування вимикачів такої фірми як «Schneider Electric».

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Sereda O., Zhorniak L., Sereda O. Improving the protective properties of electrical equipment in low-voltage cabinets of complete transformer substations auxiliaries NPP. *Electrical Engineering and Power Engineering*. 2025. № 2. P. 37–48.

УДК 621.383:620.91:537.312
Татарчук Т.В.[1], Мохнач Р.Е.[2]
[1]доц. НУ «Запорізька політехніка»
[2]директор іноваційного розвитку, Flight Control LLC

ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ТА ЕЛЕКТРИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Сонячна панель (фотоелектричний модуль) насправді складається з великої кількості сонячних елементів, кожен із яких є напівпровідниковим PN-переходом – тобто диодом, що генерує струм під дією світла[1,2]. В окремий момент освітлення один такий елемент створює невелику напругу (~0,5–0,6 В) і струм, пропорційний освітленню. Щоб отримати практично корисні значення напруги та струму (наприклад, 12 В та кілька ампер), елементи в модулі з’єднують послідовно і паралельно. У цій статті розглянуто електричні схеми таких з’єднань, приведено розрахунки характеристик і наведено приклади конструювання PV-ланок різних конфігурацій.

Фотоячейка (сонячний елемент) – це плоский PN-перехід. Один шар кремнію легується так, щоб став негативним (N-тип), інший – позитивним (P-тип). При потраплянні світла PN-перехід генерує фото-струм. Фактично, сонячна комірка – це велика (площею ~10–100 см²) світлочутлива діодна

структура [3]. Важлива особливість: «характеристики фотоелемента дуже близькі до характеристик звичайного діода [2]. Наприклад, за повної освітленості при відкритому колі він розвиває напругу близько 0,58 В [4], а його еквівалентна схема відповідає джерелу постійного струму, паралельно підключеному до діоду (Shockley diode) з додатковими резисторами (для шунт- і послідовних втрат) [3,4]. В простій моделі такої схеми струм через діод описується рівнянням Shockley, а максимальна потужність досягається в «максимальній точці потужності» на кривій I–V [7].

Ключові ідеї:

- Сонячний елемент – PN-діод, що генерує струм під освітленням [1, 2].
- При відкритому колі на 1 елементі ~0,5–0,6 В, струм пропорційний інтенсивності світла [4].
- Еквівалентна схема PV-елемента – джерело струму (прямо пропорційне освітленню) у паралелі з діодом і резисторами (шунт, послідовний опір) [3, 4].
- I–V характеристика задається Shockley: струм через діод експоненційно залежить від напруги; під світлом відбувається зсув I–V кривої вверх.

Еквівалентна схема, I–V та P-V характеристики

У стандартному однодіодному еквіваленті фотоелемента і для окремого стовпчика сонячних осередків використовується схема: ідеальне джерело струму I_{ph} (прямо пропорційне освітленню) і діод паралельно йому, з малими опорами. При збільшенні напруги діод починає протікати, і струм через навантаження зменшується (рис. 1 а). У такій моделі рівняння струму через навантаження від напруги V має вигляд:

$$I = I_{ph} - I_0 \left(exp\left(\frac{q(V + I\,Rs)}{n\,k\,T}\right) - 1\right) - \frac{(V + I\,Rs)}{Rsh} \qquad (1)$$

де I_{ph} – фотогенерований струм, I_0 – струм насичення діода (зворотний струм діода), n – коефіцієнт ідеальності, R_{sh} – шунтуючий опір (паралельний опір), R_s – послідовний опір (втрати у провідниках, контактах), k – стала Больцмана, T – абсолютна температура [2,3].

При сталому освітленні криву I–V можна розбити на точки:

- I_{SC} (коротке замикання): максимальний струм (напруга 0)
- V_{OC} (відкрите коло): максимальна напруга (струм 0).

Крива P–V характеризується робочими точками (Vm, Im) та коефіцієнтом заповнення (Fill Factor, FF), при яких потужність максимальна (точка MPP). FF характеризує ступінь наближення реальної кривої до ідеальної прямокутної.

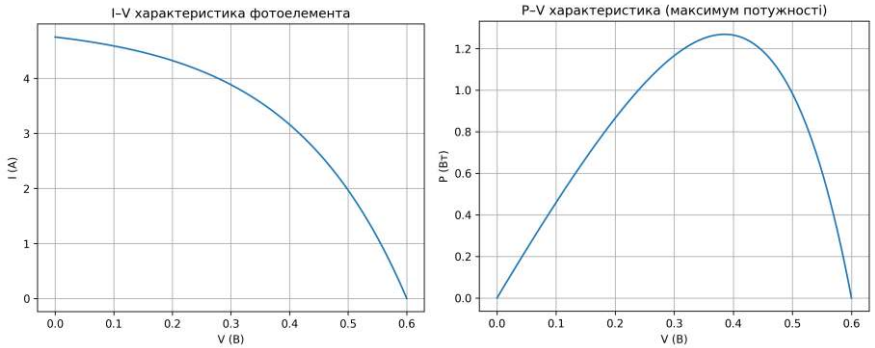


Рисунок 1 – Характеристики фотоелемента: а – I–V характеристика, б – P–V характеристика

Для визначення коефіцієнта заповнення та ККД скористуємось наступними рівняннями:

Потужність фотоелемента:

$$P = U\,I \quad (2)$$

Умова максимальної потужності:

$$dP/dV = 0 \Rightarrow I + V\,(dI/dV) = 0 \quad (3)$$

Звідси коефіцієнт заповнення визначається таким чином:

$$FF = \frac{V_m\,I_m}{V_{oc}\,I_{sc}} \quad (4)$$

ККД (ефективність) фотоелемента:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{V_m\,I_m}{E \cdot A} \quad (5)$$

Наприклад, згідно з типовими значеннями, кристал кремнію дає $V_{OC} \approx 0{,}5–0{,}6$ В, а I_{SC} залежить від площі та освітленості (для 100 см² при 1000 Вт/м² ~5–6 А) [4]. Далі для досягнення значної напруги чи струму ми підключаємо багато таких «діодів» у комбіновані схеми.

Способи з'єднання PV-елементів: послідовне, паралельне та комбіноване «серійно-паралельне»

На рис. 2 представлено види з'єднань PV-елементів.

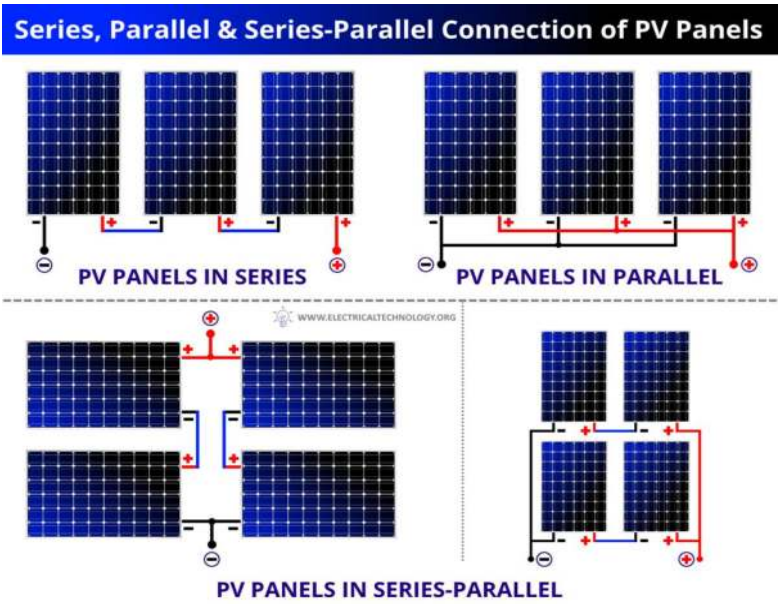


Рисунок 2 – Ілюстрація основних способів з'єднання PV-елементів: послідовне (зліва), паралельне (по центру) та комбіноване «серійно-паралельне» (справа)[7,8]

При послідовному з'єднанні PV-елементів вихідні напруги додаються, а струм через усі елементи однаковий (при ідентичних умовах). Іншими словами, якщо кожен елемент дає $V_{oc} \approx 0{,}6\,\text{В}$ і ток I, то 10 елементів послідовно забезпечать сумарну напругу $\approx 6\,\text{В}$ при тому ж токові I. Така конфігурація застосовується для підвищення напруги системи – наприклад, щоб узгодити 12 В акумулятор, потрібно ~ 20 кремнієвих елементів по 0,6 В (разом ≈12 В).

$$V_{total} = N\,V_{cell} \quad (6)$$

$$I_{total} = I_{cell} \quad (7)$$

де N – число осередків.

При цьому сумарна потужність $P = N \cdot (I \cdot V_{\text{cell}})$, тобто зростає пропорційно N. Недолік – якщо один елемент затінений чи пошкоджений, то весь

струм обмежується найгіршим елементом: «в послідовній схемі струм рівний найменшому з усіх елементів»[5,8]. На практиці тому в ряд часто додають блокувальні діоди або байпасні діоди, щоб у разі часткового затінення струм йшов іншим шляхом (див. далі).

Як видно на рисунку 2, у послідовному ланцюзі від'ємний контакт першого елементу з'єднано з позитивним наступного, напруги додаються. Формально: якщо два елемента A і B мають $V_{oc,A}$ і $V_{oc,B}$, то сумарне $V_{OC} = V_{oc,A} + V_{oc,B}$ [8]. Приклад розрахунку: якщо необхідно отримати $24\,\text{В}$ зі стандартних елементів по 0,6 В, то $N = 24/0.6 = 40$ штук.

При паралельному з'єднанні PV-елементів напруги на кожному елементі однакові, а сумарний струм є сумою струмів кожного модуля. Якщо один елемент дає струм I при напрузі V, то M таких елементів в паралель дадуть $I_{\text{total}} = M \cdot I$ при тому ж напрузі $V_{\text{total}} = V$. Така схема підходить, коли потрібно підвищити вихідний струм (приклад – живлення потужного двигуна) або в систему вводяться ряд однакових панелей.

$$V_{total} = V_{cell} \quad (4)$$

$$I_{total} = M\, I_{cell} \quad (5)$$

де M – число елементів в паралель

Наприклад, якщо на один елемент маємо 5 А при 0,6 В, то три таких паралелі дадуть $15\,\text{А}$ при 0,6 В (потужність тричі більша). У паралелі також зростає сумарна потужність $P = M \cdot (I \cdot V)$. Головне обмеження – у паралельній схемі всі гілки мають однакову напругу; якщо один модуль дає меншу напругу (через відмінності чи ушкодження), то саме він «задаватиме» напругу ланцюга. Уникають з'єднання в паралель різних моделей панелей, щоб не зменшувати ефективність.

На рис.1 (центральна схема) показано дві паралельні гілки, де позитивні контакти з'єднані разом, як і від'ємні. Підключення PV-елементів у паралель часто роблять по «строках» всередині панелі, а також по рядах панелей між собою.

В реальних масивних установках для досягнення великих напруг та струмів поєднують обидва підходи. Спочатку формують строки (послідовності осередків або панелей) потрібної напруги, а потім з'єднують такі строки паралельно для збільшення струму. Наприклад, у великому масиві може бути

10 елементів у ряд (строка) для ~6 В, а 5 таких строк паралельно дають ~30 А при 6 В. Загальна напруга залишається напругою однієї строки, а струм дорівнює сумі по всіх строках.

$$V_{total} = N\,V_{cell}\,,\; I_{total} = M\,I_{cell} \quad (6)$$

Такі серійно-паралельні з'єднання показані праворуч на рис. 2. Вони спрощують проектування: елементи однакової технології з'єднують послідовно, а потім «масиви» підключають паралельно.

Розрахунки прикладів

Приклад 1 (серія): Нехай у нас є елементи $V_{oc} = 0{,}6\,\text{В}, I_{sc} = 5\,\text{А}$. Скільки елементів потрібно для $12\,\text{В}$? Відповідь: $N = 12/0.6 = 20$. Модуль з 20 елементів дасть $V_{OC} \approx 12\,\text{В}$, струм досі 5 А (при короткому замиканні). Потужність максимальна буде порядку $P_{\max} \approx 12\,\text{В} \times I_{MPP}$.

Приклад 2 (паралель): Модуль з одного елемента (0,6 В, 5 А) може видавати ~3 Вт при MPP. Три таких паралельно – напруга 0,6 В, струм до 15 А, потужність ~$0{,}6 \cdot 15 = 9\,\text{Вт}$.

Приклад 3 (таблиця): Коротко для ілюстрації з'єднання:

Таблиця 1 – Приклад

Конфігурація	Напруга, В	Струм, А	Потужність, Вт
1 елемент (1×0,6 В)	0,6	5	3
10 послідовно (6 В×1)	6	5	30
3 паралельно (0,6 В×3)	0,6	15	9
3×10 (зібрати 3 строки по 10)	6	15	90

Тут видно, що при паралельному з'єднанні зростає струм (і потужність), при серійному – напруга.

У великих PV-модулях та масивах використовують байпасні діоди (паралельно групам осередків) та блокувальні діоди (на вході від панелі). Блокувальні діоди перешкоджають зворотному струму в темряві. Байпасні – захищають від точкових затінень.

Як пояснює PVEducation, байпасний діод підключають *навпроти* осередку (анод до «-», катод до «+» модуля) [6]. За нормальної роботи кожен елемент буде прямозміщеним, а байпасний діод – вимкненим (зворотний). Якщо ж якийсь осередок раптом опиниться затіненим і виявиться зворотнозміщеним (наприклад, через нерівномірний короткозамкнений струм), то байпасний діод відкриється і пропустить струм "навколо" цього осередка [6]. Це запобігає перегріву та пошкодженню, адже усі решта осередків зберігають струм замість того, щоб створювати на затіненому елементі напругу у декілька вольт.

Висновок: сонячні панелі конструюються як низка діодів – PV-елементів – що працюють за законами PN-переходу[1,2]. Послідовне з'єднання додає напругу (струм однаковий), паралельне – додає струм (напруга однакова)[5,8]. З'єднання доповнюються діодами-резервами для стабільної роботи при нерівномірному освітленні.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Bypass Diodes in Solar Panels and Arrays. Electronics Tutorials. URL: https://www.electronics-tutorials.ws/diode/bypass-diodes.html (дата звернення: 10.03.2026).
2. Cubas J., Pindado S., de Manuel C. Photovoltaic solar cell simulation of Shockley diode parameters. ResearchGate. URL: https://www.researchgate.net/publication/309611376 (дата звернення: 10.03.2026).
3. Equivalent Circuit of Solar Cell. Ossila. URL: https://www.ossila.com/pages/equivalent-circuit-of-solar-cell (дата звернення: 10.03.2026).
4. Equivalent circuit of a solar panel. ResearchGate. URL: https://www.researchgate.net/figure/Equivalent-circuit-of-a-solar-panel_fig1_271158300 (дата звернення: 10.03.2026).
5. Mismatch for Cells Connected in Series. PVEducation. URL: https://www.pveducation.org/pvcdrom/modules-and-arrays/mismatch-for-cells-connected-in-series (дата звернення: 10.03.2026).
6. Bypass Diodes. PVEducation. URL: https://www.pveducation.org/pvcdrom/modules-and-arrays/bypass-diodes (дата звернення: 10.03.2026).
7. Solar Cell I–V Characteristic Curves of a PV Panel. Alternative Energy Tutorials. URL: https://www.alternative-energy-tutorials.com/photovoltaics/solar-cell-i-v-characteristic.html (дата звернення: 10.03.2026).
8. Series, Parallel and Series-Parallel Connection of Solar Panels. Electrical Technology. URL: https://www.electricaltechnology.org/2020/09/series-parallel-and-series-parallel-connection-of-solar-panels.html (дата звернення: 10.03.2026).
9. Green M. A. Solar cell technology. Encyclopedia of Applied Physics. 2019.
10. Дзюба С. П. Сонячні батареї та їх застосування. Київ : Наукова думка, 2018. 256 с.
11. Белкіна Н. В. Напівпровідникові прилади. Москва : ФОРУМ, 2015. 320 с.

12. Техніка сонячної енергетики : навч. посіб. Київ, 2020. 300 с.

УДК 621.314
Стрункін Г.М.[1], Білий І.І.[2], Вербицький М.С.[2]
[1] магістр, інженер ТОВ «Плутон ІС», стейкхолдер
[2] студ. гр. Е-814сп НУ «Запорізька політехніка»

РЕАЛІЗАЦІЯ ІМПУЛЬСНОГО РЕЖИМУ ПРИ МОДЕРНІЗАЦІЇ ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ ВЕРСТАТА ЕХС-5А

Електрохімічна обробка (ЕХО) широко застосовується у виробництві лопаток для турбореактивних двигунів. Верстатний парк ЕХО до сьогодення представлений морально застарілими станками: однофазним ЕХС-5а, та трифазним ЕХС-5б. Хоча на ринку є пропозиції сучасних верстатів [1], виробники двигунів проводять модернізацію й існуючого обладнання, насамперед, їх джерела живлення [2]. Використання тиристорного реверсивного випрямляча замість діодного варіанту з механічним реверсором дозволила реалізувати імпульсний режим роботи джерела живлення, що підвищує якість обробки лопаток.

На рис. 1 показана схема модернізованого за участю автора джерела для верстата ЕХС-5а.

Реверсивний однофазний випрямляч В у складі схеми дозволяє перемикати живлення верстата між режимами травлення та профілювання (змінюючи полярність для обробки електродів). Контур керування, у складі якого є регулятор струму РС, на який приходить зворотній зв'язок з датчика струму ДС, забезпечує захисне струмообмеження. Завдяки системі імпульсно-фазового управління СІФУ випрямляч працює у безперервному або імпульсному режимах (метод часткових синусоїд). Швидкодіючий захист від припікань [2] реалізовано за допомогою транзисторного ключа змінного струму (К) у первинному ланцюзі трансформатора, який додатково захищено запобіжником F. Метод часткових синусоїд у випрямлячі, як показано на рис. 2, за своїм принципом є переривчастим режимом роботи випрямляча [3], що в сукупності з навантаженням, близьким до активного, дає імпульси струму в камері верстату.

Для експериментів зі ступенем обробки поверхні лопаток можливе формування пачок імпульсів, як показано на рис. 2, а, або просто послідовності імпульсів (рис. 2, б). При такій організації імпульсного режиму можлива і стабілізація струму в навантаженні фазовим або релейним методом.

Доволі нескладна модернізація існуючого джерела живлення верстату дозволила реалізувати імпульсний режим обробки, необхідний для підвищення якості поверхні лопаток.

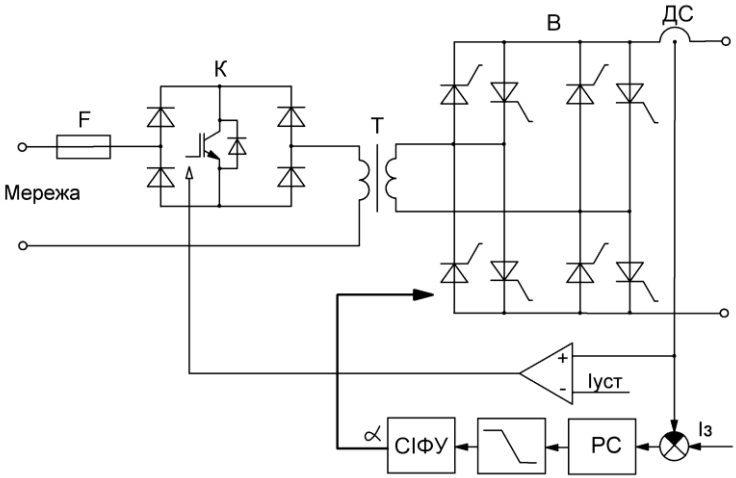


Рисунок 1 – Структура модернізованого джерела живлення верстата ЕХС-5а.

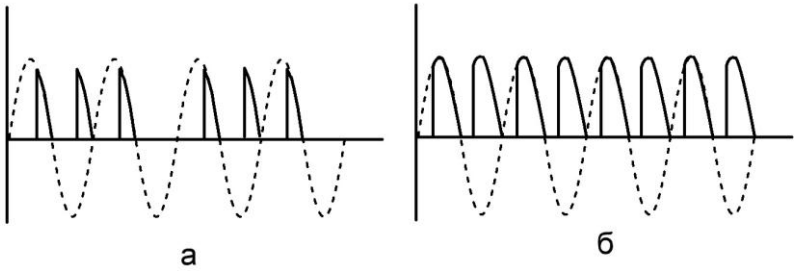


Рисунок 2 – Метод часткових синусоїд у випрямлячі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. The Cost-Effective Solution for Complex Turbine-Blade Machining with PECM Technology. URL: https://www.emag.com/products-services/machines/ecm-pecm-machines/po-100-sf/ (дата звернення 02.04.2026).

2. Олійник М. Й. Електротехнологічні об'єкти та їх електропостачання: навч. посіб. Нац. ун-т «Львів. Політехніка». Львів : Вид-во Львів. політехніки, 2016. 342 с.

3. Стрункін Г. М. Застосування пристроїв силової електроніки. Дніпр : Середняк Т. К., 2024. 408 с.

УДК 628.9/ 330.322
Медведєв А. М.[1], Селецька Я. В.[2]
[1] студ. гр. Е-415м НУ «Запорізька політехніка»
[2] старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ МОДЕРНІЗАЦІЇ ЗОВНІШНЬОГО ОСВІТЛЕННЯ ТЕРИТОРІЇ ПІДПРИЄМСТВА

Зовнішнє освітлення промислових майданчиків є енергоємним сегментом господарства. Традиційні натрієві лампи високого тиску (ДНаТ) мають значну інерційність при ввімкненні та високі пускові струми. Впровадження світлодіодних (LED) систем дозволяє не лише знизити споживання, а й інтегрувати системи автоматизації [1,2,3].

Розглядається система периметрального освітлення логістичного вузла площею 12 000 м^2. Для порівняння обрано:

1. Базовий варіант: Світильники з лампами ДНаТ-250 (потужність 280 Вт).
2. Проєктний варіант: Консольні LED-світильники (потужність 110 Вт).

Таблиця 1 – Порівняння технічних характеристик

Показник	ДНаТ-250 (Базовий)	LED-110 (Проєктний)
Тип лампи	Натрієва високого тиску	Світлодіодна матриця
Потужність світильника ($P_л$), Вт	280	110
Світловий потік, Лм	26 000	14 500
Свіловіддача, Лм/Вт	92	131
Кількість світильників (N), шт	50	50
Встановлена потужність, кВт	14,0	5,5
Термін служби, год	12 000	50 000

Економічне обґрунтування: Розрахунок проведено за умови роботи 10 год/добу (3650 год/рік) та тарифу 9,50 грн/кВт·год.

Річне споживання ДНат:

50×0.28×3650=51 100 кВт·год (485 450 грн/рік).

Річне споживання LED:

50×0.11×3650=20 075 кВт·год (190 712 грн/рік).

Річна економія: 294 738 грн.

При вартості заміни однієї точки у 8500 грн (загальні інвестиції 425 000 грн), термін окупності проєкту становить 1,44 роки.

Впровадження LED дозволяє знизити повну потужність системи освітлення на 60,7 %. Це звільняє потужність трансформаторної підстанції та зменшує падіння напруги в лініях значної протяжності. Миттєвий запуск LED-джерел виключає перенавантаження мережі пусковими струмами, притаманними газорозрядними лампами.

Висновки. Модернізація зовнішнього освітлення є високоефективним рішенням із коротким терміном окупності. Окрім прямої економії коштів, підприємство отримує стабільну роботу системи завдяки високому індексу передачі кольору та відсутності пульсацій світлового потоку.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Немикіна О. В., Мухомедьярова В. В. Впровадження енергозберігаючих ламп у виробничих приміщеннях електровозоремонтного заводу. *Сучасні проблеми інноваційного розвитку електричної інженерії* : матеріали ІІ Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції (Мелітополь, 05-25 квітня 2021 р.) / ТДАТУ: ред. кол. В. М. Кюрчев, О. А. Єременко, І. П. Назаренко [та ін.]. Мелітополь : ТДАТУ, 2021. С. 26-27.

2. Андрієнко П. Д., Немикіна О. В. Порівняння результатів світлотехнічного розрахунку виробничого приміщення аналітичним та чисельним методом. *Тиждень науки-2023. Електротехнічний факультет* : Тези доповідей науково-практичної конференції, Запоріжжя, 14-18 квітня 2023 р. / Редкол. : Вадим Шаломєєв (відпов. ред.) Електрон. дані. Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2023. С. 153-154.

3. Шевченко М. О., Ануліч А. А., Немикіна О. В. Оцінка заощадження електричної енергії в системі освітлення промислового приміщення. *Тиждень науки-2025. Електротехнічний факультет* : Тези доповідей науково-практичної конференції, Запоріжжя, 14-18 квітня 2025 р. / Редкол. : Вадим Шаломєєв (відпов. ред.) Електрон. дані. Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2025. С. 253-255.

УДК 621.314.222:621.311.1
Павленко С. В.
студ. гр. Е-814 НУ «Запорізька політехніка»

ОЦІНКА ВТРАТ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В СИЛОВОМУ ТРАНСФОРМАТОРІ

Значна кількість електроенергетичних об’єктів в Україні використовує силові трансформатори, які мають значні втрати енергії під час експлуатації. Основними складовими втрат є втрати холостого ходу та короткого замикання. Вивчення можливостей зниження цих втрат дозволяє підвищити енергоефективність електричних мереж.

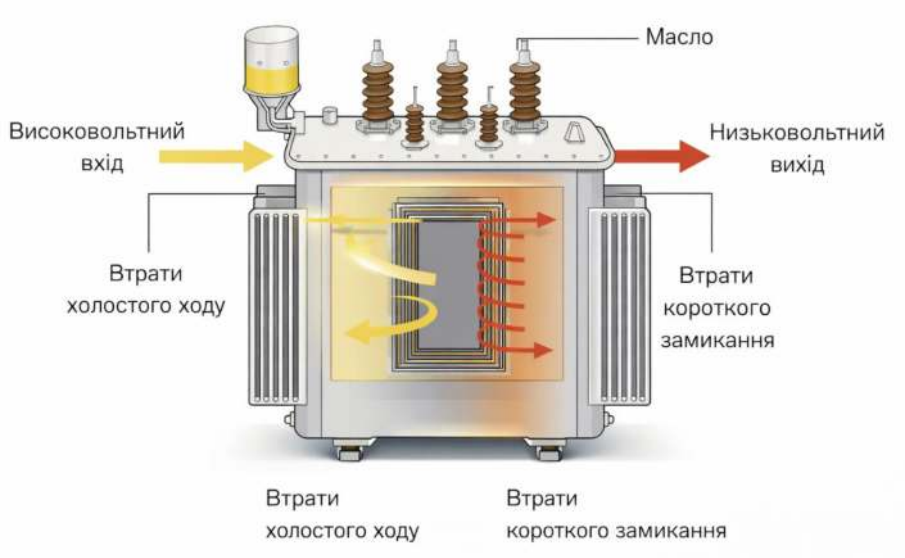


Рисунок 1 – Схема втрат енергії в силовому трансформаторі

Сучасні трансформатори мають покращені магнітні матеріали та конструкцію, що дозволяє зменшити втрати електроенергії. Використання нових типів трансформаторів забезпечує економію електроенергії та зменшення експлуатаційних витрат.

Для аналізу розглянемо два варіанти трансформаторів: стандартний та енергоефективний.

Для підстанції підприємства задано: Потужність: S = 630 кВА Напруга: 10/0,4 кВ

В табл. 1 наведено розрахункові характеристики трансформаторів.

Таблиця 1 – Розрахункові характеристики силових трансформаторів

Розрахункові характеристики	Стандартний	Енергоефективний
Тип трансформатора	ТМ-630/10	ТМГ-630/10
Потужність, кВА	630	630
Втрати холостого ходу, Вт	1200	800
Втрати КЗ, Вт	7600	5400
Струм холостого ходу, %	2,5	1,8
ККД, %	96,5	98,2
Активні втрати, кВт	8,8	6,2
Реактивні втрати, кВАр	4,5	2,7
Повна потужність втрат, кВА	9,9	6,8
Відносні втрати, %	1,57	1,08

Отже, активні втрати потужності для стандартного трансформатора становлять 8,8 кВт, а для енергоефективного – 6,2 кВт. При використанні енергоефективного трансформатора втрати зменшуються на 29,5 %.

У процентному відношенні повні втрати потужності зменшуються з 1,57 % до 1,08 %.

При модернізації трансформаторного обладнання можна досягти значного зниження втрат електроенергії та підвищення загальної ефективності електропостачання підприємства.

УДК 621.311
Буланова Ю. С.
студ. гр. Ез-815м НУ «Запорізька політехніка»

АНАЛІЗ ВТРАТ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В РОЗПОДІЛЬЧИХ МЕРЕЖАХ ТА СПОСОБИ ЇХ ЗМЕНШЕННЯ

Втрати електричної енергії в розподільчих мережах є однією з актуальних проблем сучасної електроенергетики. За даними обласних енергопостачальних компаній, зокрема обленерго, значна частина електроенергії втрачається під час передачі та розподілу через технічні та комерційні причини.

До основних технічних втрат належать: втрати в проводах і кабелях, трансформаторах, а також втрати, пов’язані з неефективним режимом роботи

мережі. Комерційні втрати виникають через несанкціоноване підключення споживачів, пошкодження лічильників та похибки обліку.

Розглянемо ділянку розподільчої мережі напругою 0,4 кВ. При довжині лінії $L = 1$ км, струмі навантаження $I = 120$ А та опорі провідника $R = 0{,}3$ Ом, втрати активної потужності визначаються за формулою:

$$\Delta P = I^2 \cdot R$$

$$\Delta P = (120)^2 \cdot 0{,}3 = 4320\,\text{Вт} = 4{,}32\,\text{кВт}$$

При використанні провідника з меншим опором ($R = 0{,}15$ Ом) втрати становитимуть:

$$\Delta P = (120)^2 \cdot 0{,}15 = 2160\,\text{Вт} = 2{,}16\,\text{кВт}$$

Таким чином, зменшення опору лінії дозволяє знизити втрати електроенергії на 50 %.

До основних заходів зниження втрат належать:

– заміна застарілих проводів на сучасні з меншим опором;
– балансування навантаження фаз;
– встановлення сучасних приладів обліку;
– боротьба з несанкціонованими підключеннями;
– модернізація трансформаторного обладнання.

Додатково слід зазначити, що в сучасних умовах розвитку електроенергетики України особливого значення набуває впровадження автоматизованих систем контролю та обліку електричної енергії (АСКОЕ). Такі системи дозволяють здійснювати дистанційний збір даних про споживання електроенергії, оперативно виявляти втрати та несанкціоновані підключення, а також підвищують точність розрахунків між постачальником та споживачем.

Важливим напрямком зниження втрат є також оптимізація режимів роботи електричних мереж. Це досягається шляхом перерозподілу навантаження між трансформаторами, вирівнювання фазних навантажень та підвищення коефіцієнта потужності за рахунок використання компенсуючих пристроїв. Підвищення коефіцієнта потужності дозволяє зменшити реактивні втрати та покращити загальну ефективність роботи системи електропостачання.

Крім того, значну роль відіграє своєчасне технічне обслуговування електрообладнання. Зношені контакти, ізоляція проводів, перевантаження ліній можуть призводити до додаткових втрат електроенергії та аварійних ситуацій. Регулярна діагностика та модернізація обладнання сприяють підвищенню надійності електропостачання та зниженню експлуатаційних витрат.

Таким чином, комплексний підхід до зменшення втрат електричної енергії, який включає технічні, організаційні та економічні заходи, дозволяє

досягти суттєвого підвищення ефективності роботи електричних мереж та забезпечити стабільне електропостачання споживачів.

Висновки. Зменшення втрат електричної енергії в розподільчих мережах є важливим напрямком підвищення ефективності електроенергетичних систем. Використання сучасних технологій та обладнання дозволяє значно скоротити як технічні, так і комерційні втрати, що позитивно впливає на економічні показники енергопостачальних підприємств.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Правила роздрібного ринку електричної енергії. Київ : НКРЕКП, 2018.

2. Кодекс систем розподілу. Київ : НКРЕКП, 2018.

3. Методика визначення технологічних втрат електричної енергії в електричних мережах. Київ : Міністерство енергетики України, 2012.

4. Бойко В. С. Електричні мережі та системи : підруч. Київ : Вища школа, 2014.

5. Кузнєцов В. Г. Електропостачання промислових підприємств. Харків : ХНУМГ, 2016.

6. АТ «Обленерго» : офіційний сайт. URL: http://zoe.com.ua/ (дата звернення: 10.04.2026 р.).

7. Савченко О. В. Основи електроенергетики : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2015.

УДК 621. 311.2

Фуртат М. Г., Шкарупа В. О.
студ. гр. Е-415м НУ «Запорізька політехніка»

МОДЕЛЮВАННЯ ДУГОВИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ ВІДКЛЮЧЕННІ СТРУМІВ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ В ВИМИКАЧАХ З ДУГОГАСНИМ ПРИСТРОЄМ АВТОКОМПРЕСІЙНОГО ТИПУ

Розвиток комутаційної апаратури пов'язане з розробкою більш досконалих методів розрахунку та розробки дугогасних пристроїв з підвищеними технічними характеристиками. Особливо гостро в Україні стоїть проблема заміни застарілих масляних і повітряних вимикачів на більш досконалі елегазові вимикачі [1]. Кількість вимикачів на клас напруги 110 кВ із використанням гексафториду сірки – SF6 становить близько 3–4% [68]. При розробці конструкцій комутаційних апаратів високої напруги особливо важливо враховувати різні газодинамічні та термодинамічні ефекти, що відбуваються в нормальних та аварійних режимах роботи та визначають необхідну для успі-

шного відключення струмів короткого замикання (КЗ) енергію приводу. Критичним режимом оперування є відключення вимикачем аварійних струмів всього діапазону відповідно до методики комутаційних випробувань IEC 62271-100 [2]. На рис. 1 наведено розподіл кількості аварійних відключень на класи напруг 72,5–800 кВ відповідно до МЕК 62271-310 [3].

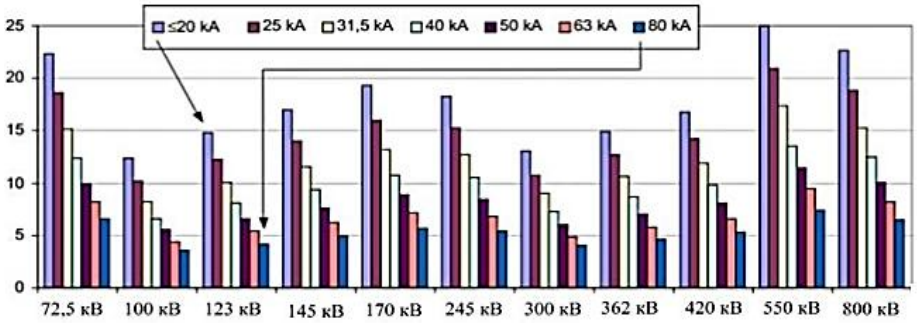


Рисунок 1 – Статистика КЗ у мережах 72,5 – 800 кВ [3]

Відомо, що більшість КЗ, що розходяться в мережі, має струм менше 20-30 кА. Тим не менш, відбуваються КЗ і зі струмами близько 50-80 кА. Ця статистика підтверджується даними джерел [4]. На даний момент в Україні не розроблені вимикачі на рівень здатності, що відключає, порядку 63-80 кА. Для вирішення цієї проблеми слід розробити математичні методи оцінки електрофізичних, газодинамічних та механічних характеристик із підтвердженням результату розрахунку за допомогою натурного експерименту.

При виконанні операції відключення елегазового вимикача між дугогасними контактами запалюється дуга. Процеси горіння, охолодження, стабілізації, гасіння та руйнування залишкового ствола дуги залежать як від власних конструктивних параметрів, так і від параметрів та режимів мережі, в якій встановлено вимикач [5]. Застосування методик розрахунку є необхідною умовою процесу оптимізації конструкції апарату.

Для визначення значення оптимізуючого параметра потрібен розрахунок конкретного режиму комутації, що впливає на здатність відключати і визначає динамічні характеристики вузлів вимикача, а також необхідну енергію приводу, при якій не буде спостерігатися уповільнення руху контактного блоку. У літературі доступні різні варіанти вирішення оптимізаційної задачі, проте подібні спрощені методики розрахунку газодинамічних показників застосовні для систем з одностороннім дуттям і без урахування впливу дуги, тобто, на холстому ходу [5].

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Abdelmalek F.A., Fanget A., Walt M. Power quality enhancement through optimum combination of controlled switching and low scatter CB drives. CIGRE Conference 2016, paper A3-304. p.p.1–10.

2. IEC 62271-100 High voltage switchgear and controlgear, Part 100: Alternating current circuit breakers, Edition 3.0., 2012.

3. IEC 62271-310 High voltage switchgear and controlgear - Part 110: Electrical Endurance testing for circuit breakers above a ratrd voltage of 52 kV, Edition 2.0, 2008-03.

4. Smeets R. P. P., Sluis L. V. D., Kapetanovic M., Peelo D. F., Janssen A. Switching in Electrical Transmission and Distribution Systems. Wiley, 2015. 424 p. ISBN: 978-1-118-38135-9.

5. Афанасьєв О. І., Жорняк Л. Б., Немикіна О. В., Щусь В. М. Електроапаратне обладнання систем електропостачання енергоємних виробництв / за заг. ред. П. Д. Андрієнка. Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2023. 432 с. ISBN 978-617-529-425-3.

УДК 621.32:658.26

Петрушин М. С.
[1] студ. гр. Е-814сп НУ «Запорізька політехніка»

ОЦІНКА ЗАОЩАДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ НА ПРОМИСЛОВОМУ МАЙДАНЧИКУ НА ПІДПРИЄМСТВІ ПРАТ «УКРГРАФІТ»

На підприємстві ПрАТ «Укрграфіт» у м. Запоріжжі використовують для зовнішнього освітлення підприємства ртутні лампи: типу ДРЛ 125 Е27, ДРЛ 250 Е40, що має відносні низькі капіталовкладення, але має високу енергоємність і має термін служби від 6 000 до 11 000 годин. Вивчення фахівців на підприємстві показує необхідність проблеми модернізації системи зовнішнього освітлення підприємства пром. майданчика №1. Світлодіодні прожектори LED 50W 6500K типу PowerLux дозволяють заощадити значну кількість електроенергії, їх середній термін служби становить від 30 000 до 50 000годин (термін служби 7років), але використання світлодіодних ламп вимагає значних капітальних витрат, а астрономічне реле часу theben selecta 170 top 2 управляє навантаженням (зазвичай освітленням) за розкладом сходу та заходу сонця на основі введених географічних координат. Ключовими характеристиками реле часу є автоматична корекція часу за сезонами, наявність енергонезалежної пам'яті (до 10 років) та перемикаючі контакти, завдяки цьому коригування часу (за 2-3 години до початки зміни) зменшує споживання електричної енергії на підприємстві.

Проектування нової або модернізація існуючої системи зовнішнього освітлення є багатоваріантним завданням виключає пошук не тільки кращих технічних рішень, а й найбільш вигідних з економічних поглядів варіантів для підприємства. Розрахунок системи для зовнішнього освітлення підприємства зроблено за допомогою проектного конструкт орного відділу підприємства ПрАТ «Укрграфіт».

Для зовнішнього освітлення підприємства (пром.майданчик №1): нормована освітленість: Ен = 400 Лк; довжина: А=450м; ширина: В=450м; площа: S = 202500 м^2;

В табл. 1 наведено розрахункові характеристики системи освітлення промислового майданчика.

Таблиця 1 – Розрахункові характеристики системи освітлення промислового майданчика

Розрахункові характеристики	ДРЛ	ДРЛ	LED
Джерело світла	Газорозрядна	Газорозрядна	Світлодіодна
Тип світильника	125 (Е27)	250 (Е40)	Power-LUX
Номінальний початковий потік лампи, Лм	6000	11000	6500К
Світловіддача світильника, Лм/Вт	45	50	120
Потужність лампи, Рл, Вт	125	250	50
Кількість ламп N, шт	100	100	200
Активна потужність освітлення (ном), кВт ($P_{ном}^{осв} = N \cdot P_л$)	100×125= 12500Вт =12,5кВт	100×250= 25000Вт =25кВт	50×200= 10000Вт =10кВт
Коефіцієнт потужності cosφ	0,6	0,9	0,9
Коефіцієнт ПРА, $К_{ПРА}$	1,1	1,1	1
Коефіцієнт попиту, $К_П$	0,9	0,9	0,9
Активна розрахункова потужність освітлення, кВт	12,37	24,75	9,9
Реактивна розрахункова потужність освітлення, кВАр	10	20	6
Повна потужність освітлення ($P_р^{осв}$), кВА	15	30	12,5
Потужність трансформатору цеху	630		

Розрахункові характеристики	ДРЛ	ДРЛ	LED
10/0,4кВ ($S_{\text{ном}}\,\tau$), кВА			
$\frac{S_{\text{р}}^{\text{осв}}}{S_{\text{ном}}\,\tau}\cdot 100\%$	2,38	4,76	1,98

Отже, активна розрахункова потужність освітлення при використані ДРЛ ламп = 37,5 кВт сумарна, при використані LED ламп = 10 кВт. При використані LED ламп активна потужність зменшується на 72,5 %.

В процентному відношенні повна розрахункова потужність освітлення системи освітлення приміщення цеху від потужності трансформатора цеху.

Для ДРЛ ламп:

$$\frac{S_{\text{р}}^{\text{осв}}}{S_{\text{ном}\cdot\tau}}\cdot 100\% = \frac{30}{630}\cdot 100\% = 4{,}76\%$$

Для LED ламп:

$$\frac{S_{\text{р}}^{\text{осв}}}{S_{\text{ном}\cdot\tau}}\cdot 100\% = \frac{12{,}5}{630}\cdot 100\% = 1{,}98\%$$

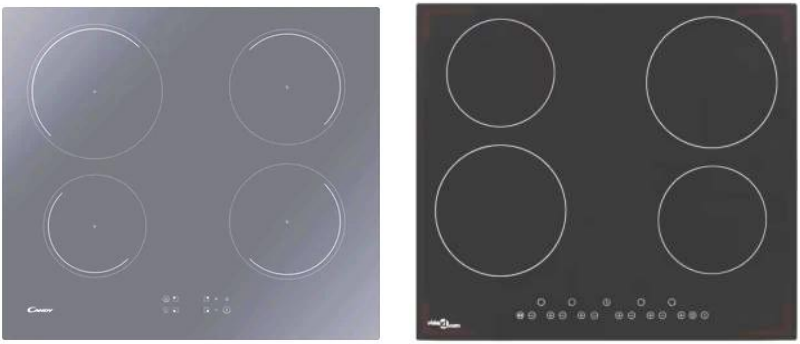
При модернізації системи зовнішнього освітлення підприємства можна досягти зменшення потужності освітлення з 4,76 % (використання ДРЛ ламп) до 1,98 % (при використанні LED ламп) та для зменшення витрат електричної енергії підприємства, що споживається зовнішнім освітленням, астрономічне реле часу додатково налаштоване, на відключення освітлення в нічний час з 22:00 до 5:00 (7 годин), при середній тривалості ночі 11 год.30хв., у зв'язку з режимом роботи підприємства.

УДК 621.365:641.5
Христич М. А.
[2] студ. гр. Е-415м НУ «Запорізька політехніка»

РІЗНИЦЯ ВИКОРИСТАННЯ ІНДУКТИВНОЇ ТА ЕЛЕКТРИЧНОЇ НАГРІВНОЇ ПОВЕРХНІ ДЛЯ ДОМАШНІХ ПЛИТ

Побутові плити можуть мати нагрівальну поверхню, виготовлену зі склокераміки або загартованого скла. Проте головна їх вагома відмінність – це різні нагрівальні елементи. Індукційна плита виробляє тепло завдяки магнітному полю, що утворюється завдяки спеціальній котушці. Нагрівається посуд, але не поверхня плити. Електрична плита розігрівається завдяки струму, що проходить. Тому спочатку поверхня гріється, а потім – посуд. Якщо у

вас їжа потрапить на поверхню під час готування, то на індукційній плиті прибрати її можна протерши м'якою ганчіркою. А от з електричною трошки інакше. Через те, що поверхня вже нагріта, то їжа пригорить і прибрати її буде важче, без додаткових «помічників» не обійтись. Час приготування на індукційній плиті в рази скорочується, проте не має функції тушкування (в дорожчих моделях вона присутня). Електрична плита, хоч і нагрівається довше, проте за допомоги керування температури є можливість тушкувати.



а *б*

Рисунок 1 – Нагрівальні поверхні індукційної (а) та електричної (б) побутових плит

Індукційне нагрівання виділяється тим, що має високий ККД (приблизно 90%), швидке нагрівання, миттєво реагує на зміну потужності, подібно до газових плит та є більш безпечним хоч і дорожчим варіантом оскільки нагрівається лише посуд, тепло не витрачається на прогрів склокераміки та повітря навколо. Хоча вони можуть працювати від 220–240 Вольт, для їхньої повноцінної роботи (використання всіх конфорок на високій потужності) рекомендується підключення до силової лінії з напругою 380–400 Вольт (три фази) або облаштування окремої виділеної лінії 220 В із кабелем великого перерізу, оскільки потужність таких плит досягає 6.5–7 кВт. Для стаціонарних плит необхідна спеціальна розетка на 25–32 А. Дуже важливо не забувати, що для такого виду нагрівної поверхні необхідно використовувати спеціальний магнітний посуд або містить спеціальну підкладку на дні посудини з феромагнітним матеріалом як - залізо, чавун, нержавіюча сталь. ЇЇ наявність обов'язкова для використання індукції.

Електротеплове нагрівання є більш універсальним бо можна використовувати старі алюмінієві чи скляні каструлі. Нагрів відбувається більш поступово, що іноді зручно для тривалого тушкування. Залишкова температура після вимкнення плита довго залишається гарячою, що дозволяє «доварюва-

ти» страву, але підвищує ризик травм. 220-230 В (однофазна мережа) або 380-400 В (трифазна мережа, що є кращим варіантом для потужних плит). Для окремих розеток під варильні панелі та плити необхідна проводка, що витримує струм від 32 до 40 А, для потужних плит потрібне підключення що може витримати потужність понад 18 кВт. Хоча цей варіант є більш доступним, має менше ККД (60–75%) тобто більші електричні втрати на розігрів та підтримання температури.

Висновок. Вибір між електричною та індукційною плитою залежить від ваших потреб і бюджету. Якщо важливі безпека та швидкість – варто обрати індукцію. Якщо ж головне – простота та доступність, електрична плита стане кращим вибором.

УДК 621.316:621.74:620.179
Василевський В. В.[1], Василевська Я. А.[2]
[1] доц. НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. ІФз-515м НУ «Запорізька політехніка»

МЕТОДИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ЛИТИХ ДЕТАЛЕЙ В ЕЛЕКТРОАПАРАТОБУДУВАННІ

Литі деталі електричних апаратів (корпуси автоматичних вимикачів і контакторів, полюсні наконечники, струмопровідні елементи) є конструктивно відповідальними компонентами. Ливарне походження зумовлює специфічний набір дефектів для таких деталей: усадкова пористість, газові раковини, холодні спаї, неметалеві включення. Ці дефекти безпосередньо знижують механічну міцність, електричну провідність і дугостійкість виробів, що робить неруйнівний контроль (НК) обов'язковим елементом системи управління якістю.

З погляду контролепридатності литі деталі електроапаратів доцільно розділити на дві групи. До першої групи належать деталі з жорсткими вимогами до електрофізичних властивостей – контактні містки, шини, струмопровідні вставки, для яких критичними є поверхневі та підповерхневі пори, що збільшують перехідний опір і є осередками дугової ерозії. До другої – несучі та корпусні деталі, де визначальними є внутрішні раковини і тріщини, що знижують ударну в'язкість і опір циклічним навантаженням у процесі комутації. Такий поділ дозволяє обґрунтовано вибирати методи і норми контролю для кожної номенклатурної позиції, уникаючи як надмірного, так і недостатнього контролю.

Для литих деталей електроапаратів застосовують кілька основних методів НК. Рентгенівська радіографія та комп'ютерна томографія забезпечують виявлення внутрішніх об'ємних дефектів і є важливими методами відпрацю-

вання технологічного процесу, проте мають обмежену придатність для серійного контролю через тривалість циклу і витрати на радіаційний захист. Ультразвуковий контроль із фазованими решітками (phased array) дозволяє контролювати деталі складної форми у реальному часі та є найбільш технологічно гнучким методом для потокового виробництва. Вихрострумовий контроль ефективний для виявлення поверхневих і підповерхневих дефектів у деталях із кольорових металів, а також дозволяє контролювати якість термообробки за зміною електропровідності. Капілярна дефектоскопія залишається найпростішим і найдешевшим методом виявлення поверхневих тріщин при вхідному контролі дрібних деталей.

Жоден із методів не є універсальним. Для корпусних деталей із алюмінієвих сплавів раціональним є тандем УЗК і вихрострумового контролю; для мідних струмопровідних елементів – вихрострумовий контроль у поєднанні з капілярною дефектоскопією. Перспективним напрямом є інтеграція засобів НК в автоматизовані виробничі лінії із застосуванням нейромережевих алгоритмів класифікації дефектів, що підвищує відтворюваність результатів і скорочує кількість помилкових спрацювань.

Впровадження комплексних методів НК дозволяє знизити рівень прихованого браку, підвищити надійність готових виробів і скоротити витрати на гарантійне обслуговування.

УДК 621.314

Афанасьєв О. І.[1], Скрупская Л. С.[2], Гуржий О. С.[3]
[1] доц. НУ «Запорізька політехніка»
[2] старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»
[3] студ. гр. Е-415м НУ «Запорізька політехніка»

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОНСТРУКТИВНИХ ЧИННИКІВ ТА РЕЖИМІВ НАВАНТАЖЕННЯ НА ПОКАЗНИКИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ НАДІЙНОСТІ ВИСОКОВОЛЬТНИХ РОЗПОДІЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ

Підвищення вимог щодо експлуатаційної надійності трансформаторних підстанцій та їх розподільних пристроїв (РП) значною мірою залежить від їх структури головних кіл. Аналіз електроапаратної частини підстанцій та їх РП показав, що значного ефекту від підвищення експлуатаційних характеристик, наприклад такої складової, як ізоляційна конструкція (ІК), є покращення системи захисту від різного роду перенапруг, а також більш рівномірним розподіленням електричного навантаження та особливостей резервування [1, 2].

Подальше зростання вимог щодо нормування та прогнозування показників експлуатаційної надійності ІК створюють необхідність вирішення задачі розрахунку та аналізу показників надійності її складових елементів. При цьому слід більш точно враховувати їх конструктивні особливості та характеристики фізичних процесів, що оказують вплив на окремі електричні апарати, яки створюють РП високої напруги [3, 4]. Опит експлуатації показує, що термін праці більшості електричних апаратів визначається двома головними чинниками, це умовами теплового режиму роботи струмопровідного контру та режимом електричного навантаження їх ІК. Якщо перший чинник достатньо стабільний у процесі експлуатації, то другий чинник має суттєву залежність від умов експлуатації та конструктивних особливостей ІК, наприклад структури системи екранування.

У сучасних високовольтних електричних апаратів для виготовлення ІК все ширше застосовують полімерні ізоляційні матеріали. Їх високу трекінгоерозійну та дугову стійкість, а також потрібні вологорозрядні характеристики забезпечуються використанням спеціального ребристого покриття із застосуванням силіконової або етиленпропіленової електротехнічної гуми. Аналіз головних характеристик ІК показав, що важливим чинником, який має вплив на показники експлуатаційної надійності, є напруженість електричного поля. В структурі ІК таких електричних апаратів, як вимірювальні трансформатори, обмежувачі перенапруг, шинні опори, тощо має місце суттєво нерівномірне розподілення напруженості електричного поля уздовж висоти або довжини ІК, що значною мірою впливає на тривалість експлуатації і, як наслідок цього, на показники експлуатаційної надійності. В таких умовах виникає необхідність оцінити вплив напруженості поля на термін експлуатації та відповідно на показники надійності ІК.

Більш того, на окремі складові РП суттєвий вплив оказує структура системи резервування головних кіл в умовах обрання тих чи інших схемних рішень. У більшості випадків підвищення глибини резервування приводить до покращення показників надійності, але при цьому можуть знижуватися економічні показники, наприклад зростання капіталовкладень у будівництво РП та підстанції в цілому. В цьому випадку гостро виникає необхідність проведення низки досліджень щодо вибору оптимальних співвідношень між такими складовими процесу проектування, як технічні рішення, рівень підвищення надійності та додаткові економічні витрати, що потрібні для цього.

З метою вирішення цієї задачі розроблено алгоритм та необхідне програмне забезпечення для визначення розподілу напруженості поля уздовж опорної ІК для різних видів електричних апаратів. Використання цього комплексу дозволяє оцінювати таки показників надійності, як ймовірність безвідмовної праці, математичне очікування середнього напрацювання до відмови та густину розподілу в умовах застосування нормального закону розпо-

ділу часу напрацювання до відмови. Розроблено логічну розрахункову модель та необхідний для її реалізації математичний апарат для оцінки головних показників надійності складних резервованих схем РП в умовах використання в якості теоретичного експоненціального закону розподілу випадкової величини.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Афанасьєв О. І., Жорняк Л. Б., Щусь В. М. Електричні апарати високої напруги. Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2021. 356 с.

2. Орлович А. Ю., Плешков П. Г., Козловський О. А., Співак О. В., Котиш А. І., Величко Т. В. Електричне обладнання підстанцій систем електропостачання / А. Ю. Орлович та ін. Кропивницький : Лисенко В. Ф., 2019. 272 с.

3. Шестеренко В. Є. Системи електроспоживання та електропостачання промислових підприємств : підруч. Вінниця : Нова книга, 2011. 656 с.

4. Трифонюк В. В. Надійність пристроїв промислової електроніки. Київ : Либідь, 1993. 64 с.

УДК 621.316.3

Антонова М.В.[1], Белобок С.А.[2], Ткаченко В.О.[2]
[1] старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. Е-412 НУ «Запорізька політехніка»

СУЧАСНІ КОМПЛЕКТНІ РОЗПОДІЛЬЧІ ПРИСТРОЇ 6–10 КВ: БУДОВА ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Комплектний розподільчий пристрій (КРП) — це електротехнічна установка заводського виготовлення, призначена для приймання, розподілу та комутації електричної енергії в мережах середньої напруги. Він складається з уніфікованих металевих шаф (комірок), у яких розміщуються комутаційні апарати, вимірювальні трансформатори, пристрої релейного захисту та збірні шини. Завдяки високому рівню заводської готовності КРП забезпечує швидкий монтаж, надійну роботу та підвищену безпеку експлуатації [1].

Такі пристрої найчастіше застосовуються в електричних мережах напругою 6–10 кВ, а також у деяких випадках до 35 кВ. Вони є основним елементом розподільчих підстанцій промислових підприємств, міських електричних мереж та енергетичних об’єктів, де необхідно забезпечити стабільне та безперервне електропостачання споживачів [2].

Конструктивно КРП виконуються у вигляді окремих комірок, кожна з яких виконує певну функцію: ввід лінії, захист трансформатора, секціону-

вання або живлення споживачів. У комірках можуть встановлюватися вакуумні або елегазові вимикачі, роз'єднувачі, трансформатори струму та напруги, а також мікропроцесорні термінали релейного захисту. Усі елементи об'єднані системою збірних шин, що забезпечує гнучкість схемних рішень [1, 3].

До основних номінальних параметрів КРП належать напруга 6–10 кВ, номінальні струми від 630 до 2500 А, а також здатність відключати струми короткого замикання на рівні 12,5–31,5 кА. Також важливими характеристиками є термічна та електродинамічна стійкість, які забезпечують працездатність обладнання в аварійних режимах протягом заданого часу [3].

Комплектні розподільчі пристрої широко використовуються в Україні на міських трансформаторних підстанціях, промислових підприємствах, об'єктах енергетичної інфраструктури та комунального господарства. Зокрема, вони застосовуються в системах електропостачання металургійних комбінатів, водоканалів, теплових електростанцій та розподільчих мереж облєнерго [2], [4].

Перевагами КРП є компактність, висока ступінь безпеки, модульність конструкції, а також скорочення часу монтажу та введення в експлуатацію. Недоліками можна вважати відносно високу вартість обладнання та необхідність кваліфікованого технічного обслуговування [1], [3].

Завдяки цим характеристикам КРП є сучасним і ефективним рішенням для побудови надійних систем розподілу електричної енергії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Попович М. Г., Лозинський О. Ю., Клепіков В. Б. Електромеханічні системи автоматизації та електропривод. Київ : Либідь, 2005. 680 с.

2. Безрученко В. М. Теорія електроприводу : підручник. Дніпро : ДНУЗТ, 2011.

3. Електричні розподільчі пристрої 6–10 кВ. Технічні характеристики КРП. URL: https://electrocontrol.com.ua (дата звернення: 10.04.2026).

4. КРУ та КРП у системах електропостачання України. URL: https://slavgorenergo.com.ua (дата звернення: 10.04.2026).

УДК 62-83:62-52

Антонова М.В.[1], Запривода Д.Т.[2], Самаренко Є.В.[2]
[1] старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. Е-812 НУ «Запорізька політехніка»

АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ НЕКЕРОВАНИМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ

Некеровані електроприводи являють собою системи, в яких електродвигун працює без активного регулювання швидкості або моменту під час роботи. Найчастіше в таких системах використовуються асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором, рідше – синхронні двигуни. Основною особливістю є функціонування у фіксованих режимах із керуванням типу «вмикання–вимикання», причому в більшості випадків відсутній зворотний зв'язок [1].

Найпростішою системою керування є прямий пуск двигуна, коли він безпосередньо підключається до електричної мережі. Такий спосіб відзначається високою надійністю, простотою та низькою вартістю, однак супроводжується значними пусковими струмами, що можуть у декілька разів перевищувати номінальні значення, а також створює підвищені механічні навантаження на обладнання [2].

Для зменшення пускових струмів застосовується схема «зірка–трикутник», у якій запуск відбувається при зниженій напрузі, а після розгону двигун переходить у номінальний режим. Цей метод дозволяє суттєво знизити струм, проте має недолік у вигляді зменшеного пускового моменту та ступінчастого характеру зміни режимів роботи [2].

Ще одним способом є пуск через автотрансформатор, який забезпечує більш плавне зниження напруги під час запуску. Це дозволяє краще контролювати пускові процеси і зменшити навантаження на мережу, але така система є складнішою та дорожчою в реалізації порівняно з попередніми [3].

У випадку двигунів із фазним ротором застосовується реостатний пуск, при якому в роторне коло вводиться додатковий опір. Це дає можливість отримати високий пусковий момент при обмеженні струму, однак супроводжується значними втратами енергії та потребує більш складного обслуговування [2].

Незважаючи на відсутність регулювання швидкості, некеровані системи виконують базові функції керування, такі як пуск, зупинка, реверсування обертання, а також захист від перевантажень, коротких замикань і перегріву. Часто також передбачаються блокування та системи сигналізації для забезпечення безпечної експлуатації [4].

Загалом некеровані електроприводи характеризуються низькою складністю, високою надійністю та невеликою вартістю, однак мають обмежену гнучкість і середній рівень енергоефективності. Вони створюють значні пускові струми та не дозволяють оптимізувати режими роботи залежно від умов навантаження [1].

Такі системи доцільно використовувати в установках, де не потрібне регулювання швидкості, наприклад у насосах, вентиляторах, компресорах і

конвеєрах із постійною швидкістю. У цих випадках їх простота та надійність є вирішальними перевагами [4].

Водночас сучасні тенденції розвитку електроприводів спрямовані на впровадження керованих систем, зокрема частотних перетворювачів і мікроконтролерного керування, що дозволяє значно підвищити енергоефективність і функціональність систем [3].

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Лавріненко Ю. М., Марченко О. С., Савченко П. І. Електропривод : підручник. Київ : Ліра-К, 2009. 504 с.

2. Бондаренко В. М., Каплун В. В. Електропривод : навч. посіб. Київ : Вища школа, 2013. 367 с.

3. Попович М. Г., Лозинський О. Ю., Клепіков В. Б. Електромеханічні системи автоматизації та електропривод. Київ : Либідь, 2005. 680 с.

4. Основи та системи електроприводу : навч. посіб. Дніпро : НГУ, 2018. 312 с.

УДК 621.314

Скрупська Л. С.[1], Зінченко Д. С.[2], Мазур К. І.[2]
[1] старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. Е-415м НУ «Запорізька політехніка»

АНАЛІЗ СТРУКТУРНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЕЛЕМЕНТІВ СТРУМОПРОВІДНОГО КОНТУРУ У РОЗПОДІЛЬНИХ ПРИСТРОЯХ

Системи електропостачання, що забезпечують передачу електричної енергії у структурі збірних шин підстанцій живлення та їх розподільних пристроїв до споживачів характеризуються значною різноманітністю. У процесі експлуатації має місце нагрів елементів струмопровідного контуру, на що витрачається частина електроенергії. Внаслідок цього мають місце витрата енергії на створення електромагнітних полів причому тім більше, чім вище величина номінальної напруги мережі. Тому означені втрати електроенергії необхідно враховувати при проектуванні будь-якої електромережі. Обсяг таких втрат у значній мірі залежить від характеру навантаження, а також його змінення у процесі експлуатації. В цьому випадку суттєвий влив на процес проектування має така особливість, як якість електричної енергії та засоби для її забезпечення. В умовах експлуатації якість електричної енергії визначається показниками, що характеризують відповідність напруги її нормованим величинам в умовах номінальних значень таких параметрів, як частота мережі живлення, напруга та струм навантаження.

Для розподільних пристроїв забезпечення якості електричної енергії складається у забезпеченні рівнів напруги та частоти мережі максимально наближених до номінальних величин [1]. В умовах енергоємних виробництв застосовано цілий ряд споживачів (прокатні стани, дугові сталеплавильні пічки, випрямляючи пристрої, системи електролізу тощо) з різко змінними навантаженнями, або суттєвою нерівномірністю їх розподілу між фазами. Крім того, присутні струми та напруги, форма яких значно відрізняється від синусоїдальної. Наявність таких споживачів порушує якість електричної, наприклад відхилення напруги, розкид змінення напруги, коефіцієнт несинусоїдальності кривої напруги, коефіцієнт зворотній послідовності напруг, відхилення частоти тощо.

Негативна дія низької якості електричної енергії на роботу розподільних пристроїв сприяє зростанню втрат електричної енергії, скороченню протяжності роботи обладнання, технологічних втратах, що сприяють зниженню виробничих можливостей та погіршенню якості продукції, що виробляється. Таким чином, суттєвого зниження втрат потужності можливо отримати шляхом регулювання рівнів напруги, що у свою чергу, залежить від величини втрат напруги у мережі, яки визначаються її опором. У розподільних пристроях активний опор струмопровідного контуру більше реактивного, що дозволяє забезпечити мінімізацію втрат енергії шляхом зміненням площі зрізу струмопровідних елементів. У живлячих мережах навпаки – реактивний опір більше активного, тому втрати напруги у значній мірі визначаються реактивним опором ліній, який мало залежить від площі зрізу. В таких умовах змінення реактивного опору зручно забезпечити за рахунок регулювання напруги шляхом включення у лінію батарей статичних конденсаторів за схемами повздовжнього або поперечного регулювання [2].

Активну потужність живлячих мереж не можливо використовувати для оперативного регулювання напруги, тому найбільш ефективним засобом залишається реактивна потужність. Для змінення реактивної потужності використовують різноманітні пристрої регулювання, серед яких найбільш широке використання отримали пристрої наступних видів: батареї статичних конденсаторів, синхронні компенсатори, статичні джерела реактивної потужності тощо.

Для дослідження втрат потужності в електричних мережах розроблені алгоритми розрахунку потрібних параметрів та головних показників якості електричної енергії. При цьому враховується вплив конкретних особливостей мережі, а також специфіки споживачів енергії та схеми їх підключення. Для цього розроблено комп'ютерну модель для дослідження процесів протікання струмів та розподілу потужностей на прикладі схеми розподільного пристрою для живлення споживачів з індуктивним навантаженням. На основі цієї моделі створено програмне забезпечення, що дозволяє визначити основні

показники якості електричної енергії та здійснити визначення ефекту, що отримується внаслідок використання тих чи інших засобів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Шестеренко В. Є. Системи електроспоживання та електропостачання промислових підприємств : підруч. Вінниця : Нова книга, 2011. 656 с.

2. Орлович А. Ю., Плешков П. Г., Козловський О. А., Співак О. В., Котиш А. І., Величко Т. В. Електричне обладнання підстанцій систем електропостачання. Кропивницький : Лисенко В. Ф., 2019. 272 с.

УДК 621.313.333

Антонова М.В.[1], Соловйов Д.В.[2], Зінченко В.О.[3]
[1] старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. Е-812 НУ «Запорізька політехніка»
[3] студ. гр. Е-412 НУ «Запорізька політехніка»

АНАЛІЗ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ДВИГУНАМИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ В РЕЖИМІ СТАЛОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Двигуни постійного струму, що працюють під постійним навантаженням, можуть використовувати різні системи керування, які відрізняються принципом дії, складністю та енергоефективністю. Оскільки навантаження є сталим, основна задача керування полягає у забезпеченні стабільної швидкості обертання, надійного пуску та економічної роботи привода [1].

Найпростішою є система без регулювання, коли двигун підключається безпосередньо до джерела постійної напруги. У цьому випадку швидкість визначається електромеханічними характеристиками двигуна та параметрами навантаження. Така система характеризується простотою та високою надійністю, однак супроводжується значними пусковими струмами і не дозволяє змінювати швидкість [1].

Реостатне керування передбачає введення додаткового опору в коло якоря двигуна. Це дозволяє обмежити пусковий струм і здійснювати регулювання швидкості, проте супроводжується значними втратами електроенергії у вигляді тепла, що знижує ефективність системи [2].

Більш ефективним є керування шляхом зміни напруги живлення двигуна, яке реалізується за допомогою керованих випрямлячів (тиристорних перетворювачів). Такий підхід забезпечує плавне регулювання швидкості, зменшення енергетичних втрат і покращення динамічних характеристик електропривода [3].

Сучасним і найбільш ефективним методом є імпульсне керування (широтно-імпульсна модуляція), яке застосовується в електронних перетворювачах. Воно дозволяє досягти високого коефіцієнта корисної дії, широкого діапазону регулювання швидкості та стабільності роботи електропривода [3].

Порівнюючи ці системи, можна зробити висновок, що нерегульовані та реостатні системи є простими і дешевими, але мають низьку енергоефективність. У той же час тиристорні та імпульсні системи забезпечують значно кращі експлуатаційні характеристики, що робить їх більш доцільними для сучасних електроприводів, навіть при постійному навантаженні [2].

Отже, вибір системи керування визначається вимогами до економічності, точності регулювання та складності системи. Для простих умов достатньо базових методів, тоді як для підвищення ефективності доцільно використовувати сучасні електронні системи керування [1].

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Пижов В. М., Красношапка Н. Д., Островерхов М. Я. Електропривод. Механіка електроприводу. Електромеханічні властивості двигунів постійного струму [Електронний ресурс] : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 198 с.

2. Безрученко В. М. Теорія електроприводу [Електронний ресурс] : підручник. Дніпро : ДНУЗТ, 2011.

3. Лавріненко Ю. М. та ін. Електропривод : підручник. Київ : Ліра-К, 2009. 504 с.

4. Щур І. З., Костинюк Л. Д., Когут А. Р. Електропривід за системою «джерело струму – двигун постійного струму». *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. 2003. № 479. С. 207–212.

УДК 621.311

Немикіна О. В.[1], Стовбуров О. А.[2]
[1] доц. НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. Е-814 НУ «Запорізька політехніка».

ВИКЛИКИ ДЛЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ УКРАЇНИ У ВОЄННИЙ СТАН

Станом на 2026 рік електроенергетична система України проходить глибоку трансформацію, зумовлену як воєнними викликами, так і довгостроковими змінами в енергетичному секторі. Після 2022 року ЕЕС опинилася під безпрецедентним тиском: руйнування значної частини генеруючих потужностей, систематичні атаки на енергетичну інфраструктуру та порушення стабі-

льності постачання електроенергії змусили переглянути традиційні підходи до її побудови та функціонування.

Згідно з висновками досліджень Міжнародного енергетичного агентства (IEA, 2024), класична централізована модель енергосистеми, що базується на великих вузлових електростанціях, є вразливою в умовах сучасних загроз. Історично енергосистема України формувалася навколо потужних теплових, атомних і гідроелектростанцій, які забезпечували ефективне та стабільне енергопостачання в мирний час. Проте така структура має суттєвий недолік – високу концентрацію генерації. Втрата навіть одного великого об'єкта призводить до значного дефіциту потужності та може дестабілізувати роботу всієї системи.

Події після 2022 року наочно продемонстрували цю проблему: внаслідок пошкодження або знищення окремих електростанцій виникали масштабні перебої в енергопостачанні, що впливало як на промисловість, так і на населення. У зв'язку з цим одним із ключових напрямів розвитку стало впровадження децентралізованої моделі енергетики.

Сучасна модель поступово переходить до комбінованої генерації, яка включає: централізовану базову генерацію (АЕС, ТЕС (ТЕЦ), ГЕС (ГАЕС)) та розподілену генерацію (значну роль грають сонячні дахові електростанції), з локальними накопичувачами енергії. Загальні обсяги виробництва електроенергії на кінець грудня 2024 р. становили 12-14 ГВт щогодини. Відсоток виробітку електроенергії розподіленої генерації за рахунок відновлювальних джерел енергії (ВДЕ) зріс до 9%, рис. 1, у порівнянні з довоєнним періодом, рис. 2.

Децентралізація ЕЕС є стратегічною відповіддю на вразливість централізованої ЕЕС за умов воєнних загроз. Впровадження децентралізації створює нову модель ЕЕС, яка є більш гнучкою та стійкою.

Такий підхід дозволяє не лише підвищити надійність, а й зробити систему більш резильєнтною - здатною працювати навіть при часткових пошкодженнях. Вагомим чинником підвищення резильєнтності ЕЕС України став перехід на паралельну роботу з ENTSO-E . Це дало змогу залучати аварійну допомогу від сусідніх ЕЕС для подолання кризових ситуацій та здійснювати імпорт електроенергії. У міру ускладнення ЕЕС України традиційні методи управління стають недостатніми. Значну роль в децентралізація ЕЕС грає штучний інтелект (ШІ), який використовується для: прогнозування споживання електроенергії; передбачення генерації сонячними та вітровими електростанціями, управління накопичувачами та балансування системи в реальному часі. По оцінкам експертів масове впровадження побутових накопичувачів в розподілену генерацію може частково замінити теплову генерацію яка була втрачена в 2025 році, а ШІ виступає ключовим інструментом координації цих ресурсів.

Сучасна трансформація ЕЕС України передбачає:

– розвиток розподіленої генерації (сонячні, вітрові електростанції, малі ТЕЦ, когенераційні установки);

– створення локальних енергетичних вузлів і мікромереж (microgrids), здатних працювати автономно;

– інтеграцію систем накопичення енергії (акумуляторні батареї, гідроакумулюючі станції);

– підвищення гнучкості та керованості мереж за рахунок цифровізації та автоматизації.

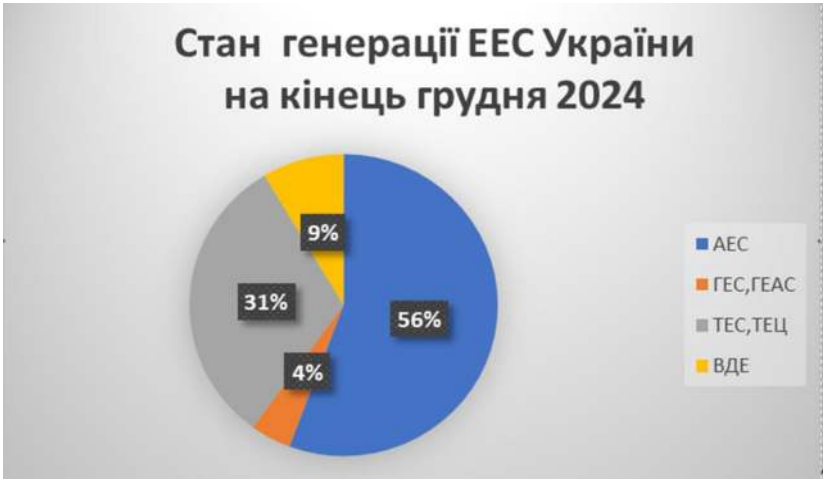


Рисунок 1 – Стан генерації ЕЕС України на кінець грудня 2024 [1]



Рисунок 2 – Стан генерації ЕЕС України на серпень 2020 [2]

Таким чином, Україна поступово переходить від централізованої до більш гнучкої, децентралізованої та стійкої енергосистеми, здатної ефективно функціонувати навіть в умовах підвищених ризиків і загроз.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ukraine: From War To Peace and Recovery. Analytical Assessments. December 2024. URL: https://razumkov.org.ua/images/2025/01/16/2024-PAKT-December-RC.pdf (дата звернення: 13.01.2025).

2. Немикіна О. В. Поновлювальні та альтернативні джерела енергії: навчальний посібник. Запоріжжя : Видавництво НУ «Запорізька політехніка», 2020. 187 с.

УДК 621.311

Немикіна О. В.[1], Тертишний В. О.[2]
[1] доц. НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. Е-814сп НУ «Запорізька політехніка»

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ПРИ РІЗКОЗМІННИХ НАВАНТАЖЕННЯХ ПРОМИСЛОВОГО ПІДПРИЄМСТВА

Значна кількість промислових підприємств, особливо металургійні виробництва, в Україні експлуатує обладнання з різкозмінним та нелінійним характером навантаження (зварювальні комплекси, дугові печі, підйомно-

транспортні механізми). Це призводить до значного споживання реактивної енергії, погіршення якості електроенергії, виникнення коливань напруги (флікера) та додаткових втрат у мережах.

Вивчення проблеми показує, що традиційні конденсаторні установки з контакторним керуванням не здатні ефективно та швидко реагувати на такі різкі зміни навантаження через затримки в комутації.

Використання сучасних систем динамічної компенсації, таких як статичні тиристорні компенсатори (СТК) або активні фільтри (STATCOM) (Static Synchronous Compensator), напругою від 6 до 220 кВ (промислові підприємства, розподільчі або живильні мережі) або автоматичних конденсаторних установок (АКУ), напругою 0,4-10 кВ, дозволяє в режимі реального часу відстежувати зміни та миттєво генерувати необхідну реактивну потужність. Хоча таке обладнання вимагає більших капітальних витрат, воно значно підвищує енергоефективність.

Для аналізу було розглянуто систему електропостачання ділянки зварювального цеху до та після впровадження системи автоматичних конденсаторних установок (АКУ).

Дані для розрахунку: Потужність трансформатора цеху: Sном.т = 1000 кВА; Напруга: 10/0,4 кВ; Середня активна потужність навантаження: P = 500 кВт.

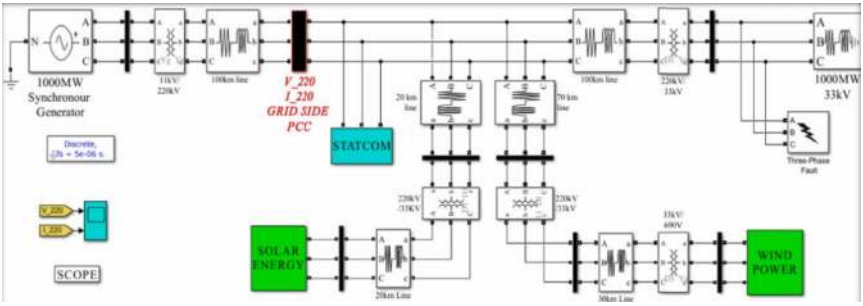


Рисунок 1 – Схема під'єднання системи динамічної компенсації на базі STATCOM

У таблиці 1 наведено розрахункові характеристики системи електропостачання цеху.

Таблиця 1 – Розрахункові характеристики системи електропостачання цеху

Характеристика	Без компенсації	З використанням АКУ
Коефіцієнт потужності, cosφ	0,65	0,96

Активна потужність, Р, кВт	500	500
Реактивна потужність, Q, кВАр	585	146
Повна розрахункова потужність, S, кВА	769	521
Струм навантаження, І, А	1110	752
Втрати активної потужності в лінії, ΔР, кВт	18,5	8,5
Завантаження трансформатора $\frac{S}{S_{\text{ном.т}}} \cdot 100\%$	76,9%	52,1%

Отже, при впровадженні динамічної системи компенсації АКУ коефіцієнт потужності cosφ підвищується з 0,65 до 0,96.

При цьому повна розрахункова потужність та струм навантаження зменшуються на 32,2 %. Це дозволило знизити завантаження цехового трансформатора з 76,9 % до 52,1 %, що вивільняє значний резерв потужності (майже 248 кВА) для можливого підключення нового технологічного обладнання без заміни існуючого трансформатора.

Втрати активної потужності в лініях електропередачі знизилися з 18,5 кВт до 8,5 кВт. У процентному відношенні зменшення втрат склало 54 %.

При модернізації системи компенсації реактивної потужності на об'єктах з різкозмінним навантаженням можна досягти не лише зниження втрат електроенергії та підвищення пропускної здатності мереж, але й суттєво покращити якість електроенергії, що подовжує термін служби промислового обладнання.

УДК 621.311
Немикіна О. В.[1], Харченко В. Р.[2], Петрушин М. С.[2]
[1] доц. «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. Е-814сп НУ «Запорізька політехніка»

ДАХОВА СОНЯЧНА ФОТОЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ ЯК НАПРЯМОК ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ НЕЗАЛЕЖНОСТІ СУЧАСНОГО ПРОМИСЛОВОГО ПІДПРИЄМСТВА

Перехід від централізованої моделі електропостачання до мережі автономних кластерів, підвищення стійкості громад, розбудові Microgrids, полягає у впровадженні відновлюваних джерел та систем накопичення енергії. Застосування дахової сонячної фотоелектростанції (ФЕС) для цеху або промислового приміщення як одного з найперспективніших рішень для підвищення автономності та енергетичної незалежності сучасного промислового підприємства. Світова тенденція переходу промисловості до відновлюваних джерел енергії вже давно стала частиною стратегії розвитку країн ЄС та інших економічно розвинених держав. Використання сонячних електростанцій на дахах виробничих будівель активно впроваджується у транспортному машинобудуванні, металообробці, логістичних центрах та інших енергоємних галузях. Це пов’язано не тільки з економічною ефективністю, але й із підвищенням рівня енергетичної автономії, що має критичне значення в умовах нестабільного енергопостачання та зростання тарифів на електроенергію.

Усі ці споживачі цеху працюють переважно у денний час, причому графік їх завантаження більш-менш стабільний у розрізі робочої зміни. Саме така сумісність із природною характеристикою сонячної генерації робить використання ФЕС максимально вигідним підприємство отримує електроенергію саме тоді, коли вона найбільше потрібна.

Для того щоб оцінити потенційну користь від впровадження ФЕС, було проведено аналіз фактичних електричних навантажень цеху. Це включало побудову графіка добового, тижневого та сезонного споживання, дослідження коефіцієнта потужності, розподіл активної та реактивної складових, а також врахування технологічних особливостей обладнання. Виявлено, що майже 70% річного споживання припадає на світлу частину доби, що дозволяє значну частку енергії отримувати безпосередньо від сонячної генерації, зменшуючи таким чином потребу в електроенергії з мережі. Це не тільки зменшує навантаження на трансформаторну підстанцію, але й скорочує втрати в мережі та знижує загальні витрати підприємства.

Однією з ключових переваг встановлення сонячних панелей на даху цеху є раціональне використання наявної інфраструктури. Дахи промислових приміщень, як правило, мають значну площу й не несуть додаткових функцій, що робить їх ідеальним майданчиком для монтажу фотоелектричних модулів. Завдяки цьому підприємству не потрібно виділяти додаткову земельну ділянку або вносити зміни у виробничий процес. Таке рішення мінімізує втручання у внутрішню логістику, не впливає на розміщення обладнання і не створює перешкод для роботи персоналу [1,2].

Особлива увага в межах проєкту приділяється вибору оптимального кута нахилу панелей та їх орієнтації. На основі даних щомісячної інсоляції було визначено, що влітку найвищі показники досягаються при кутах від 10° до 35°, тоді як у міжсезоння ефективнішими можуть бути кути 35-50°. Оскільки дахова система зазвичай є стаціонарною, важливо підібрати універсальний компроміс, який забезпечить достатній рівень генерації протягом усього року. Додатково враховувалися втрати, пов'язані з температурним нагріванням панелей, забрудненням поверхні та неідеальною орієнтацією. Аналіз показує, що навіть із врахуванням цих факторів дахова ФЕС забезпечує високий середньорічну генерацію електричної енергії.

ФЕС становитися ключовим компонентом у розвитку децентралізованих енергетичних мереж, сприяючи сталому розвитку енергетики.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Немикіна О. В., Капля Д. Н., Худолій Б. Ю., Немикіна О. С. Оцінка виробництва електроенергії дахової сонячної станції. Енергетичний фронт: шостий театр воєнних дій (стратегія захисту, управління та відновлення) : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. (Київ, 27 берез. 2026 р.). Київ : ІПМЕ ім. Г. Є. Пухова НАН України, 2026. С. 144–148.

2. Немикіна О. В. Поновлювальні та альтернативні джерела енергії : навч. посіб. Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2020. 187 с.

СЕКЦІЯ «ФІЗИКА»

УДК 377(477):37.014:004:331.5
Татарчук Т.В.
доц. НУ «Запорізька політехніка»

СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ ТЕХНІЧНОЇ ТА ПРОФЕСІЙНОЇ ОСВІТИ

Професійна та технічна освіта перебувають у стадії активних змін під впливом глобалізації, цифровізації та трансформацій на ринку праці. Сьогодні наголошується на практико-орієнтованому навчанні, інтеграції з виробництвом та розвиткові цифрових навичок. Такі ініціативи відповідають цілям сталого розвитку (SDG 4), які включають забезпечення доступу до якісної професійно-технічної освіти (TVET) та виховання навичок для праці [1,2].

У цій статті проведено огляд основних світових трендів у технічній і професійній освіті, а також реформ в Україні. Розглянуто впровадження дуальної освіти, освітніх технологій і цифрових платформ, взаємодію з бізнесом і розвиток інноваційних підходів до навчання. Особливо акцентовано на статистичних показниках і реальному досвіді реформування в українському контексті.

1. Глобальні тенденції у професійній освіті

Цифрова трансформація та ІТ-компетентності. Сьогодні цифрові технології формують усі галузі економіки, тому цифрові навички стають ключовими для майбутніх фахівців. ВООЗ та ЮНЕСКО підкреслюють, що 80% нових професій вимагають цифрових компетенцій [3]. Тому багато країн оновлюють навчальні програми, впроваджують адаптивні онлайн-платформи і штучний інтелект у навчальному процесі [3,4]. Наприклад, конференція ЮНЕСКО зосередилася на цифровій трансформації професійної освіти, де навчальні заклади вчаться ефективно використовувати цифрові ресурси та формувати ІТ-навички студентів [4]. Зокрема, розробляються тренінги та курси підвищення кваліфікації вчителів: за підтримки ООН у Білорусі створено 24 нові програми з цифрових навичок, і понад 1500 викладачів пройшли навчання з використання ІТ-інструментів [3].

Штучний інтелект і інновації. Впровадження ШІ у професійній освіті відбувається на різних рівнях: адаптивні системи навчання, автоматизоване оцінювання та симулятори. Згідно з прогнозами, 60% людей вважають, що ШІ сприятиме ринку праці, хоча 1 з 8 побоюється автоматизації [5]. Проте Всесвітній економічний форум прогнозує не заміщення людей, а співпрацю людини і машини [5]. Поки країни розробляють настанови для інтеграції ШІ в освітні програми, створюються пілотні проєкти з використанням ШІ в практичних заняттях [3].

STEM-освіта і інженерні компетенції. Попит на фахівців у науці, технологіях, інженерії та математиці (STEM) зростає. Школи та ПТУ впроваджують інженерні курси, робототехніку, лабораторні класи зі складними приладами. Наприклад, у багатьох країнах будуються технічні центри та лабораторії зі штучним устаткуванням (лабораторії VR/AR, симулятори технологічних процесів). Як показує досвід Білорусі, створено 53 «центр компетентності» при підприємствах, де учні працюють на сучасних машинах і програмах [6]. Така модель готує фахівців безпосередньо до вимог промисловості та швидко оновлює матеріально-технічну базу.

Безперервна освіта (lifelong learning). Зміни на ринку праці вимагають постійного оновлення знань. Країни стимулюють перепідготовку робітників, пропонуючи короткострокові курси і відкриваючи «навчальні центри» при підприємствах. Наприклад, проєкт ЮНЕСКО з цифровізації професійної освіти спрямований на підвищення кваліфікації кадрів у розвинених і країнах, що розвиваються [4]. Відповідно до SDG 4.3, держава зобов'язана забезпечити доступ до недорогої і якісної ПТО.

Гармонізація з європейськими стандартами. Для підвищення мобільності студентів і визнання дипломів ПТУ інтегрують свої програми до європейських кваліфікаційних рамок. Наголос робиться на сукупному кредитному трансфері, дуальній освіті та сертифікації робітничих професій за стандартами ЄС.

2. Професійна освіта в Україні

2.1. Реформи та законодавча база

В Україні реформування професійно-технічної освіти (ПТО) набуває особливої актуальності у післявоєнний період як частина відновлення економіки. Прийнято низку законодавчих актів та ініціатив для оновлення системи:

Нове законодавство (2023–2025). 2023 року Верховна Рада ухвалила зміни до Закону «Про професійну (професійно-технічну) освіту», заклавши основу для реформи (гнучка система кваліфікацій, акцент на стандартизації). У 2024 році МОН представило Стратегічний план розвитку освіти до 2027 р., де одним із пріоритетів стало реформування ПТО (підвищення якості, престижу та інтеграція з ЄС)[7,8]. У 2025 році триває робота над законом «Про професійну освіту», який спрямований на уніфікацію правових відносин і створення єдиної системи ПТО з урахуванням потреб ринку праці [8]. Ці зміни надають формальні гарантії модернізації професійної освіти в Україні.

Матеріально-технічна база. Оновлено положення щодо створення навчально-практичних центрів. За підтримки міжнародних партнерів (наприклад, швейцарського проєкту DECIDE: ПРОФТЕХ) у 2024 році отримано фінансування 2 млн швейцарських франків (понад 80 млн грн) для обладнання майстерень та лабораторій[9]. Затверджено нові освітні стандарти і профе-

сійні стандарти (20 стандартів ПТО у 2024 році)[10]. Усі ці заходи спрямовані на забезпечення учнів ПТУ сучасним обладнанням та інструментами.

Дуальна освіта. Введення елементів дуальної освіти є ключовою частиною реформ. У 2024–2025 роках в Україні продовжується поступове збільшення програм, де учні 30% часу навчаються теорії, а 70% – проходять практику на підприємствах. Наприклад, у 2025 році впроваджуються проєкти для масштабування дуальної форми (враховуючи кращий європейський досвід)[11][12]. Офіційні дані МОН свідчать, що лише 5 тисяч нових учнів 2024 року обрали дуальну форму, а залученість бізнесу досі залишається низькою[13].

Профорієнтація і кар'єрний супровід. Значні зусилля спрямовані на створення системи профорієнтації для молоді. Шкільникам пропонується система індивідуального супроводу при виборі професії, що реалізується в рамках програми DECIDE: ПрофТех [9]. Також оновлюються програми навчання для вирішення кадрового дефіциту, що утворився через війну та міграцію робітників.

Проблеми та виклики. Нинішня система зіштовхується із кількома проблемами: відсутністю достатньої кількості сучасних викладачів і майстрів, зношеністю обладнання та інфраструктури, а також низьким престижем робітничих професій (що стримує вступ абітурієнтів). Наприклад, у 2024–2025 рр. очікувано нехватка учнів через демографію та воєнні обставини, тому реальне зростання частки дуальної освіти (7,7%) частково зумовлене скороченням загальної кількості учнів, а не лише збільшенням числа дуальників[14].

2.2. Співпраця з бізнесом і індустріальні ініціативи

Для підвищення актуальності ПТО, Україна активно розвиває програми співпраці освіти з виробництвом. До прикладу, створюються спільні навчально-практичні центри на базі підприємств і навчальних закладів, де учні мають можливість освоювати сучасне обладнання за участю фахівців-практиків [11,16]. Також впроваджується механізм субсидій і компенсацій роботодавцям, які беруть на практику учнів, що стимулює бізнес до співпраці. З досліджень відомо, що за умови фінансової підтримки роботодавці готові брати значно більше учнів (зокрема з 12 до 26 осіб на компанію) [17].

Міжнародний досвід показує, що тісна взаємодія із промисловістю поліпшує результати навчання й працевлаштування. Наприклад, у країн Європи створено системи «центрів компетенції», де студенти ПТО опановують реальне виробниче обладнання. Подібно, український уряд підтримує проєкти з будівництва навчальних виробництв при відомих підприємствах, щоб забезпечити практичну підготовку за останніми технологіями.

2.3. Статистика дуальної освіти в Україні

Статистичний аналіз показує, що хоча дуальна освіта розвивається, її масштаби поки що малі. За даними МОН і дослідницьких центрів, у 2020–2023 навчальних роках кількість учнів на дуальній формі стабілізувалась на рівні 10–12 тисяч осіб (~5% від загальної кількості учнів ПТО). Лише у 2023/24 р. почався помітний ріст – понад 16 тисяч учнів (≈7% загальної кількості) навчаються за дуальною формою [15]. Якщо б загальна кількість учнів залишалася на рівні 255 тис., ця частка становила б лише 6,6% [14], тобто реальний відсоток збільшився частково через демографічне скорочення.

Наразі залучення бізнесу до дуального навчання в Україні є критично низьким – лише 1,4% підприємств взяли участь у програмах дуальної освіти [13]. Для порівняння, середнє значення в ЄС становить близько 32,4% [13]. Відповідно, на рисунку 3 видно, що частка дуальної освіти в Україні значно відстає від європейського рівня.

Таблиця 1 – Динаміка дуальної освіти в Україні (2020–2025 рр.) [14,15]

Навчальний рік	Загальна кількість учнів ПТО, тис.	Учні на дуальній формі, тис.	Частка (%).
2020/2021	260	12	4,6
2021/2022	252	11	4,4
2022/2023	245	10	4,1
2023/2024	218	16,0	7,3
2024/2025	216	16,7	7,7

2.4. Інноваційні технології в українській ПТО

Українська ПТО активно впроваджує новітні технології в освітній процес. Зокрема: - Використання VR/AR симуляторів для безпечного відпрацювання виробничих процесів (наприклад, в гірничодобувній чи медичній галузі). - Оснащення майстерень цифровим обладнанням: програмними верстатами з ЧПК, 3D-принтерами, CNC-станками, інтерактивними мультимедійними класами. - Впровадження едукуаційних платформ (наприклад, Moodle, Coursera) для дистанційного та змішаного навчання. Завдяки цьому учні можуть поєднувати теорію й практику, маючи доступ до лекційних матеріалів в електронному вигляді. - Підвищення цифрової компетентності викладачів та учнів: МОН України запроваджує спеціальні тренінги та сертифікації з ІТ-навичок для педагогів ПТО, щоб кожен учитель міг ефективно використовувати ІТ-інструменти.

Таким чином, українська професійна освіта стає більш технологічною і готовою до вимог сучасного ринку праці.

3. Порівняльний аналіз України та зарубіжних моделей

Хоча кожна країна має свої особливості, можна виділити загальні напрямки й ключові відмінності:

Дуальна освіта. Найуспішніші моделі (Німеччина, Австрія, Швейцарія) забезпечують високий рівень участі бізнесу. Так, у Німеччині близько 60% учнів ПТО навчаються за дуальною схемою (70% практики на виробництві, 30% – у школах). В Україні цей показник – лише ~7% (2024/25) [15]. Різниця пояснюється ступенем залученості підприємств: у ЄС середньо 32% бізнесу бере участь у дуальній освіті, а в Україні – 1,4% [13].

Фінансування. У розвинутих країнах витрати на ПТО значно вищі як у перерахунку на учня. Європейські країни гарантують стабільне державне фінансування ПТО та додаткові кошти з бізнесу і місцевих бюджетів. Україна також намагається збільшити бюджет ПТО: на 2024–2025 роки передбачено субвенції для модернізації бази та оплати праці кваліфікованих педагогів ПТО[11,9].

Якість освіти. За рівнем освітніх програм і матеріальної бази ПТО Україна дотягує до ЄС, але поступово. В ЄС всі навчальні програми адаптовані до потреб ринку (часто розробляються разом із роботодавцями). В Україні також проводиться модернізація програм: 2024 року затверджені нові професійні стандарти, гармонізовані з європейськими, а старі предмети замінюються на інноваційні (наприклад, комп'ютерна графіка замість креслення).

Підвищення престижу. У Європі існують системи популяризації робітничих професій (змагання WorldSkills, стипендії від підприємств, безкоштовне гуртожиткове забезпечення). В Україні держателес бувають недостатніми, але зусилля є: започатковано всеукраїнські конкурси кваліфікації (WorldSkills Ukraine), збільшено стипендії від держави та підприємств.

В цілому, за останні роки Україна наздоганяє світові тренди: більший акцент на цифровізації, дуальній формі, партнерстві з бізнесом. За оцінками експертів, подальша інтеграція з європейським простором та впровадження світових практик дозволять швидко покращити результати української ПТО[11,18].

4. Основні напрями і перспективи розвитку

Напрями розвитку технічної та професійної освіти найближчим часом:

Розвиток дуальної освіти. Збільшення участі підприємств – шлях до підвищення працевлаштовуваності випускників. Це передбачає більше стимулів для бізнесу (податкові пільги, субсидії за державною програмою, спільна підготовка кадрів).

Розвиток EdTech. Впровадження електронних навчальних платформ і мобільних додатків, які дозволяють поєднувати очне і дистанційне навчання. Зростає використання мультимедійних навчальних матеріалів, інтерактивних тренажерів і онлайн-спільнот практиків.

Фокус на зелених технологіях. З огляду на екологічні цілі, ПТО включає нові спеціальності (екологічна енергетика, модернізовані автомотовимірю-

вання тощо). Відбувається перепідготовка кадрів у «зелений» сектор через короткі курси: наприклад, Solar PV-installation, енергоаудит будівель тощо.

Міжнародна мобільність і акредитація. Збільшується обмін викладачами та учнями з ЄС, розширюються програми дуального стажування за кордоном. Це стимулює гармонізацію стандартів освіти.

Персоналізація навчання. Із розвитком ІТ-платформ можливе індивідуальне навчання за адаптивними траєкторіями. Учень може гнучко обирати курси, спрямовані саме на потреби його підприємства чи ринку.

Оцінювання результатів освіти. Вводяться нові підходи до тестування (автоматизоване і дистанційне), оцінювання практичних навичок за єдиними критеріями та використання мікро- і нано-сертифікатів за короткострокові модулі.

Врахування цих напрямів сприятиме тому, що технічна та професійна освіта в Україні зможе ефективно відповідати на виклики XXI століття.

Таким чином, сучасна технічна та професійна освіта стрімко змінюється: цифровізація, штучний інтелект, інтеграція з промисловістю та глобалізація ринку праці є рушійними факторами трансформації. Україна стоїть на шляху побудови гнучкої системи ПТО, яка враховує потреби економіки та інновації. Результати реформ поки що поступові, але є важливі здобутки: модернізуються матеріальна база, впроваджується дуальна освіта, розширюється використання ІТ у навчанні [3,11]. Головним завданням залишаються подолання кадрового дефіциту в сільських районах, підвищення престижу професійної освіти та залучення роботодавців до навчального процесу.

При подальшій послідовній реалізації реформ технічна та професійна освіта може стати ефективним інструментом відродження економіки, сприяючи підготовці висококваліфікованої робочої сили для сучасних галузей промисловості та інноваційних підприємств. Водночас важливим напрямом розвитку є адаптація освітніх програм до європейських стандартів підготовки фахівців, розширення міжнародного співробітництва та академічної мобільності здобувачів освіти. Особливої уваги потребує формування цифрових, підприємницьких і комунікативних компетентностей, які є затребуваними на сучасному ринку праці. Не менш важливим є розвиток системи безперервної освіти дорослого населення та перекваліфікації працівників в умовах технологічних змін. У перспективі саме поєднання інноваційних освітніх підходів, державної підтримки та активної співпраці з бізнесом забезпечить конкурентоспроможність української професійної освіти на міжнародному рівні.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. UNESCO Institute for Statistics. Technical and Vocational Education and Training (TVET): Data and statistics [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://uis.unesco.org (дата звернення: 26.03.2026).

2. United Nations Development Programme. How vocational education is changing with AI, innovations and future skills [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.undp.org (дата звернення: 26.03.2026).

3. UNESCO. TVET Leadership Programme on Digital Transformation [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.unesco.org (дата звернення: 26.03.2026).

4. Eurydice. Національні реформи у сфері професійної (професійно-технічної) освіти [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://eurydice.eacea.ec.europa.eu (дата звернення: 26.03.2026).

5. Міністерство освіти і науки України. Стратегічний план розвитку освіти до 2027 року [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://mon.gov.ua (дата звернення: 26.03.2026).

6. Міністерство освіти і науки України. Проєкт Закону «Про професійну освіту» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://mon.gov.ua (дата звернення: 26.03.2026).

7. Міністерство освіти і науки України. Розвиток професійної освіти (DECIDE: ПРОФТЕХ) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://mon.gov.ua (дата звернення: 26.03.2026).

8. KSE Institute. Дуальна професійно-технічна освіта в Україні: аналітичний звіт. – Київ, 2025. – 60 с.

9. Державна служба статистики України. Освіта в Україні: статистичні дані 2023–2025 рр. – Київ, 2025.

10. OECD. Skills for Jobs Database [Electronic resource]. – Mode of access: https://www.oecd.org (access date: 26.03.2026).

11. European Commission. Vocational education and training in Europe: Ukraine report. – Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2020. – 120 p.

12. UNESCO. Technical and Vocational Education and Training (TVET) Strategy 2022–2029. – Paris : UNESCO, 2022. – 56 p.

13. World Bank. World Development Report 2019: The Changing Nature of Work. – Washington : World Bank, 2019. – 151 p.

14. Освітні тренди 2025 року [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://ed-era.com (дата звернення: 26.03.2026).

15. Освітні тренди: яких фахівців потребує країна [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://nus.org.ua (дата звернення: 26.03.2026).

16. В Україні змінено систему професійної освіти [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.rbc.ua (дата звернення: 26.03.2026).

17. Фінансування професійної освіти в Україні [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://nim.media (дата звернення: 26.03.2026).

18. Проблеми розвитку професійної освіти в Україні [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://dream.gov.ua (дата звернення: 26.03.2026).

УДК 620.179.1:535.37:621.383
Татарчук Т.В.[1], Новохатній І.П.[2]
[1] доц. НУ «Запорізька політехніка»
[2] асп. гр. А-Е6.15 НУ «Запорізька політехніка»

ОПТИЧНІ ДЖЕРЕЛА ВИПРОМІНЮВАННЯ В СИСТЕМАХ ЛЮМІНЕСЦЕНТНОГО НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

Люмінесцентна дефектоскопія є різновидом неруйнівного контролю поверхневої цілісності твердого тіла, що ґрунтується на явищі капілярного проникнення індикаторної рідини всередину зовнішніх несуцільностей досліджуваного зразка та подальшого їх візуального відображення під дією ультрафіолетового опромінювання завдяки сприятливим квантовим та хвильовим властивостям такого оптичного діапазону.

Зазначений метод надає змогу виявити дефекти з шириною до 0,1 мм та глибиною до 0,03-0,04 мм, внаслідок чого набув неабиякого поширення в численних галузях промисловості, як-от ливарне виробництво, аерокосмічне матеріалознавство, приладобудування тощо, для поверхневого діагностування:

- кольорових металів;
- зварних сполук;
- пластмасових або керамічних виробів;
- синтетичних матеріалів тощо.

Технологічна послідовність люмінесцентної дефектоскопії регламентована міжнародними багатокомпонентними стандартами ISO 3059, ISO 3452 та ISO 9934, що передбачають виконання таких заходів:

1) попереднє очищення поверхні досліджуваного зразка механічним способом, як-от шліфуванням, або хімічним травленням органічними розчинниками з подальшим їх висиханням під дією теплого повітря;

2) оброблення індикаторною рідиною, яку називають пенетрантом, за допомогою занурення в технологічну ванну, намазування пензлем або аерозольного розпилення;

3) усування надлишків індикаторної рідини, застосовуючи хімічні погашувачі з подальшим нанесенням речовин-проявників;

4) спостереження люмінесціювання поверхневих дефектів під впливом ультрафіолетових опромінювачів з довжиною хвилі приблизно 360 нм;

5) остаточне очищення поверхні досліджуваного зразка для подальшого використання за призначенням.

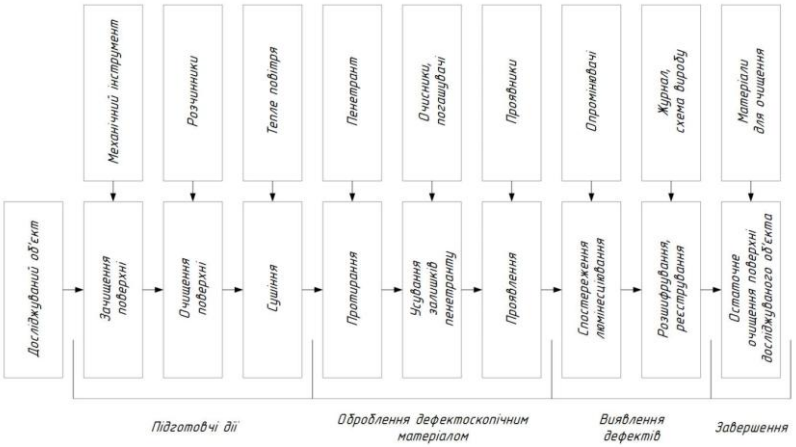


Рисунок 1 – Технологічна послідовність методу люмінесцентної дефектоскопії як різновиду капілярного неруйнівного контролю. [3]

Усі штучні джерела ультрафіолетового випромінювання умовно поділяють на теплові, газорозрядні, лазерні та напівпровідникові.

У теплових джерелах оптичне випромінювання зумовлене нагріванням тіла розжарювання до певних високих температур, у газорозрядних – електричним розрядом між електродами в середовищі газу або парів металів.

Фізичне підґрунтя лазерних систем становить квантовомеханічний спосіб вимушеного випромінювання, а світлодіодних – явище електролюмінесценції внаслідок прикладання до напівпровідникових структур різниці потенціалів.



Рисунок 2 – Джерела ультрафіолетового випромінювання. [8]

Коефіцієнт корисної дії теплових джерел, до яких відносять вольфрамові та галогенні лампи, в ультрафіолетовому діапазоні є незначним, тому їх застосування під час проведення люмінесцентного аналізування не є доцільним з огляду на спектральний склад випромінювання.

Розглядаючи лазерні пристрої, варто зауважити досить високу вартість їх виготовлення, у зв'язку з чим, не зважаючи на виняткову властивість стосовно високої інтенсивності сфокусованих променів, що може досягати близько 1015 Вт/см2, втілення їх в більшу частину діагностувальних процесів не є раціональним.

З цього погляду в умовах сьогодення як опромінювальні джерела дефектоскопічного обладнання найбільшого поширення набули:

– ртутні газорозрядні лампи низького, високого та надвисокого тиску, оскільки структура енергетичних рівнів атомів ртуті є сприятливою для високоекономічного утворення резонансного випромінювання в ультрафіолетовому діапазоні;

– світлодіоди, що виготовлені з широкозонних напівпровідникових структур нітриду галію (GaN), нітриду галію-алюмінію (AlGaN) або нітриду алюмінію (AlN).

Тип лампи	Номінальна потужність, Вт	Номінальна напруга, В		Струм споживання, А		Строк використання, годин
		в мережі живлення	в звичайному режимі на лампі	під час запускання	в звичайному режимі	
ПРК-2	375	220	120±12	5–8	3,7±0,6	2500
ПРК-4	220	127	70±8	5–6	3,7±0,6	1000
ПРК-7	1000	220	135	11,7–14	8,05±1,0	12000
СВД-120	120	220	114	1,7–2,0	1,2	250
СВД-120А	120	220	114	1,7–2,0	1,2	250
ДРШ-250-3	250	127	72	5–8	4,1	500

Рисунок 3 – Електричні параметри деяких вітчизняних ртутних газорозрядних ламп спеціального призначення. [1]

Проведений огляд деяких монографічних видань [1,7] дає змогу стверджувати про такі визначальні відмінності багатьох ртутних газорозрядних лампах спеціального призначення від сучасних світлодіодних систем:

– більша споживана потужність;

– менший за тривалістю строк використання;

– довгочасне стабілізування світлотехнічних параметрів після подання напруги живлення через пускорегулювальний пристрій;

– необхідність у зовнішніх оптичних елементах (лінзах, розсіювачах, відбивачах) для відокремлення ультрафіолетового випромінювання зі спектрального складу.

Тип лампи	Енергетична освітленість на відстані 1 м від лампи							Час стабілізування світлотехнічних параметрів, хвилин
	Загальна, мквт · см$^{-2}$	У діапазоні УФ-А (320-380 нм)		У діапазоні УФ-В (280-320 нм)		У діапазоні УФ-С (200-280 нм)		
		мквт · см$^{-2}$	%	мквт · см$^{-2}$	%	мквт · см$^{-2}$	%	
ПРК-2	775	149,0	19,0	187,0	25,0	112,0	15,0	10–15
ПРК-4	435	84,5	19,5	111,5	25,5	68,0	15,5	
ПРК-7	2800	530,0	19,0	620,0	22,0	420,0	15,0	
СВД-120	147	35,0	23,5	2,0	1,5	0,0	0,0	
СВД-120А	310	62,2	21,0	60,3	19,0	53,0	17,0	
ДРШ-250-3	755	179,0	23,5	98,0	13,0	28,0	3,5	

Рисунок 4 – Світлотехнічні характеристики деяких вітчизняних ртутних газорозрядних ламп спеціального призначення. [1]

До того ж, на відміну від газорозрядних джерел, світлодіодним системам притаманні:

– менші геометричні розміри;

– високий (майже до 100 %) коефіцієнт використання потоку випромінювання;

– витривалість до механічних навантажень;

– здатність функціювати в широких температурних межах;

– екологічність, що пов’язано з відсутністю парів ртуті та інших шкідливих речовин;

– відносна простота електричних ланцюгів живлення.

Додатково звертаючи увагу на результати патентних досліджень [4–6], а також останніх науково-практичних робіт [7,9], можна зробити висновок стосовно поступового впровадження випромінювальних діодів як практичного засобу вдосконалення електричних та енергетичних характеристик наявних дефектоскопічних приладів. [1–9]

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Кушлик Р. В., Постол Ю. О., Кушлик Р. Р. Джерела і установки для електричного освітлення : навч. електрон. посіб. Мелітополь : ТДАТУ, 2020. 145 с.

2. Методи і засоби неруйнівного контролю якості продукції : конспект лекцій / уклад. А. А. Ткачук, В. Ю. Заблоцький, Т. В. Терлецький. Луцьк : ЛНТУ, 2017. 196 с.

3. Андрусенко Ю. М. Освітлювач для ендоскопів: пат. 63668 Україна : МПК A61B1/06. № 2003054654 ; заявл. 22.05.2003 ; опубл. 15.01.2004, Бюл. № 1. URL: https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/374294/ (дата звернення: 25.04.2026).

4. Бондаренко А. М. Освітлювач для мікроскопа: пат. 25699 Україна : МПК G02B 21/06. № a200510080 ; заявл. 26.10.2005 ; опубл. 27.08.2007, Бюл. № 13. URL: https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/308412/ (дата звернення: 25.04.2026).

5. Кіріченко М. В. Світлодіодний освітлювач: пат. 33676 Україна : МПК G01R 31/26, H01L 21/66. Заявник і патентовласник Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». № u200801452 ; заявл. 04.02.2008 ; опубл. 10.07.2008, Бюл. № 13. URL: https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/316419/ (дата звернення: 25.04.2026).

6. Семенов А. О., Попов С. В., Сахно Т. В., Тарасенко Д. С. Ультрафіолет: сфери використання та джерела випромінювання : монографія. Полтава : ПП «Астрая», 2023. 190 с.

7. Суворова К. І., Гуракова Л. Д. Джерела світла : навч. посіб. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021. 110 с.

8. Ультрафіолетові опромінювальні установки фотобіологічної дії: дослідження та розробка технології та обладнання для опромінювання сипучих харчових продуктів та насіння сільгоспкультур: звіт про НДР (остаточ.) / Вищий навчальний заклад Укоопспілки «Полтавський університет економіки і торгівлі» ; кер. А. О. Семенов. Полтава, 2019. 175 с. № ДР 0115U006063. Інв. № 0719U006163.

УДК 536.4:621.763

Danylo Nechaiev[1], Tatarchuk Tetiana[2], Richard Mokhnach[3], Nataliia Zhukova[4]
[1] student of group A-G5.15 NU “Zaporizhzhia Polytechnic”
[3] associate professor, NU “Zaporizhzhia Polytechnic”
[2] Technical director, PJSC “ZPEA”
[4] associate professor, NU “Zaporizhzhia Polytechnic”

JUSTIFICATION OF THE USE OF COPPER-GRAPHITE COMPOSITES FOR ECOLOGICAL PRODUCTION

The global demand for refined copper is Global demand for refined copper is on the path of realizing future risks. Some research predicts a severe supply deficit as early as 2040–2050 [1]. This "Copper Crunch" is particularly felt in regions like Ukraine, which lack significant domestic deposits and must rely on costly imports or the secondary market [2]. The solution lies in a material revolution: Ultra-Conductive Copper (UCC) [3,4]. By reinforcing copper with carbon nanotubes

(CNTs), researchers are creating composites that are not only stronger, but significantly lighter—slashing up to 80% of traditional weight, a breakthrough that could save the aerospace industry 25,000 tons of fuel annually [4].

Copper's beauty lies in its face-centered cubic (FCC) lattice, where a "sea" of electrons allows for high conductivity [5]. Carbon nanostructures like CNTs and graphene bring the muscle, boasting tensile strengths near 100 GPa and thermal conductivities exceeding 3000 W/m·K [4, 8].

However, engineering these two together is a nightmare because they have almost zero mutual solubility [4, 9]. This creates a weak interface governed only by faint Van der Waals forces, which act as a barrier to heat and electricity. To overcome this, scientists must navigate the Gibbs-Thomson effect, where the melting points of nanoparticles drop as they get smaller, complicating the consolidation process [10, 11].

Modern research is moving away from simple mixing toward high-energy synthesis:

– Submerged Plasma Synthesis: By using electrical discharges in liquid solutions like, researchers can synthesize "core-shell" nanoparticles at rates of up to 6.9 mg/min [12]. Post-synthesis laser modification allows for precise control over particle sizes, typically between 20 and 50 nm.

– Atmospheric-Pressure Plasma Jets (APPJ): This energy-efficient method allows for the synthesis of multiwalled CNTs directly onto graphite surfaces without the need for complex vacuum chambers.

– Induction Melting with a Twist: Innovations in induction furnace melting within graphite crucibles reach temperatures of 1100–1200°C. By applying intense mechanical stirring and electric currents, additives like boron or CNTs are shielded from oxidation and distributed uniformly throughout the melt, preventing the common problem of "clumping".

To bridge the gap between copper and carbon, the nanotubes must be modified [8]:

– Metallurgical Bridges: "Decorating" CNTs with Nickel (Ni) or Silver (Ag) creates a chemical bond. Nickel is particularly effective, forming metastable at the interface, which ensures a strong connection that boosts tensile strength to 364.9 MPa.

– Chemical Anchors: Oxidizing the CNTs introduces oxygen groups (–COOH) that act as anchors, facilitating the formation of phases that "grip" the copper matrix.

– The Power of Magnets: Applying a 1 Tesla magnetic field during synthesis can align CNT clusters, skyrocketing thermal conductivity by 361–386%.

The resulting performance of Cu/CNT composites markedly surpasses that of conventional copper in terms of electrical capability, mechanical durability, and sustainability impact. These materials are able to sustain current densities up to two

orders of magnitude higher than those of pure copper, while simultaneously exhibiting a reduced temperature coefficient of resistance, which allows their electrical efficiency to exceed that of monolithic copper at operating temperatures above approximately 80–100 °C. Such behavior is particularly beneficial for high-power applications, where resistive heating typically limits conductor performance. In addition to their electrical advantages, Cu/CNT composites display significantly improved wear resistance under practical service conditions. Cast components tested in electric railway pantographs demonstrated a 1.4-fold increase in wear resistance compared to conventional copper, an effect attributed to carbon nanostructures that function as intrinsic solid lubricants by forming a protective carbonaceous tribofilm during operation. Beyond functional performance, these composites also offer substantial environmental benefits, as plasma-assisted processing routes enable the upcycling of end-of-life copper products, such as decommissioned railway cables, into high-quality powders suitable for additive manufacturing. Relative to primary copper production from ore, this approach reduces global warming potential by approximately 70%, highlighting the role of ultra-conductive copper composites as both a technological advancement and a viable pathway toward circular-economy integration.

We are witnessing a shift from laboratory curiosity to industrial-scale application. By mastering the nanoscopic "handshake" between copper and carbon, we are entering an era of materials that are stronger, lighter, and greener. Strategic upcycling and plasma-based synthesis aren't just technical choices; they are the keys to resource independence for the high-tech industries of tomorrow.

REFERENCES

1. Ren, X., Chang, Y., & Ge, C. (2024). State-of-the-Art Carbon-Nanotubes-Reinforced Copper-Based Composites: The Interface Design of CNTs and Cu Matrix. International Journal of Molecular Sciences, 25(23), 12957.

2. Subramaniam, C., Yamada, T., et al. (2013). One hundred fold increase in current carrying capacity in a carbon nanotube-copper composite. Nature Communications, 4, 2202.

3. Sundaram, R., Sekiguchi, A., et al. (2018). Copper/carbon nanotube composites: Research trends and outlook. Royal Society Open Science, 5(11), 180814.

4. Мохнач, Р. Е., & Андрієнко, П. Д. (2020). Мідні і сталемідні композиційні матеріали з високими електротехнічними властивостями. Вісник НТУ «ХПІ», № 1, 47–52.

5. Jiang, H., Cooke, L., et al. (2024). Copper–Carbon Nanotube Composites Enabled by Brush Coating for Advanced Conductors. ACS Applied Nano Materials, 7(10), 11176–11183.

6. Yang, G., Wang, R., et al. (2022). Nano-silver modified carbon nanotubes to reinforce the copper matrix composites and their mechanical properties. Advanced Powder Technology, 33(8), 103672.

7. Tarasenko, N. V., Nevar, A. A., et al. (2010). Plasma synthesis and treatment of copper-based nanopowders. The Moldavian Journal of the Physical Sciences, 9(3-4), 314–323.

8. Поплавко, Ю. М. (2017). Фізика твердого тіла. Том 1: Структура, квазічастинки, метали, магнетики. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського.

9. Zhan, R.-T., Zhang, H.-B., et al. (2025). Recent Advances in Recycling of Copper-Based Waste Materials: A Critical Review. cMat, 2(2), e70005.

10. Zavidovskiy, I. A., Streletskiy, O. A., et al. (2025). Energy-Effective Synthesis of Multiwalled Carbon Nanotubes via Ambient-Air Atmospheric-Pressure Plasma Jet Treatment of Graphite. Surfaces, 8(1), 16.

11. Piasecki, A., Sobkowiak, J., et al. (2024). The Influence of the Modification of Carbon Nanotubes on the Properties of Copper Matrix Sintered Materials. Materials, 17(6), 1427.

12. Wang, D., Yan, A., et al. (2022). Interfacial Bonding Improvement through Nickel Decoration on Carbon Nanotubes in CNTs/Cu Composite Foams. Nanomaterials, 12(15), 2548.

УДК 621.793.7
Золотаревський О.І.
старш. Лаб. НУ «Запорізька політехніка»

ЕЛЕКТРОННИЙ ТЕРМОМЕТР

За допомогою програми Proteus 8 Professional було розроблено електронний термометр, який дозволяє міряти температури в діапазоні від 100 ^{0}C до 1100 ^{0}C. Похибка такого термометра становить від 2 до 3 ^{0}C. Схему наведено на рис1.

За основу була взята мікросхема LM358N, яка є двома операційними підсилювачами. Кожен каскад підсилювача здатний підвищувати напругу в 10 разів, а два каскади разом підвищують в 100 разів.

Розрахунок був зроблений таким чином, що 100 ^{0}C відповідає 1В. Тобто, максимальна температура, яку може виміряти електронний термометр дорівнює 1100 ^{0}C, що становить 11В показів електронного вольтметра. Блок живлення мікросхеми повинен бути не менше 11В.

Електронний термометр складається з чотирьох послідовно з'єднаних термопар хромельалюмель, плати підсилювача, цифрового вольтметра, блока живлення 12В.

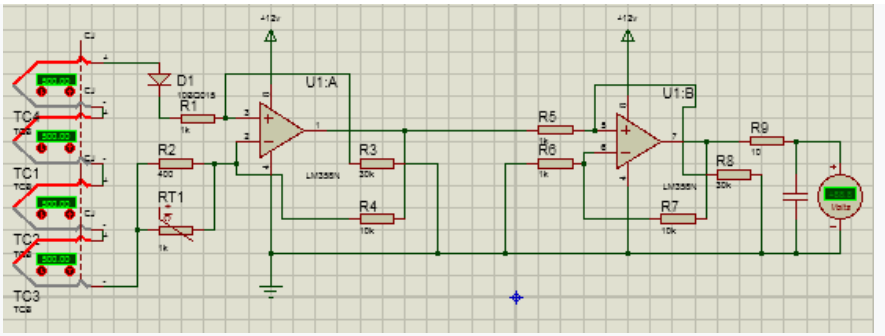


Рисунок 1 – Схема електронного термометра

У електронному термометрі використовується чотири послідовно з'єднані термопари, щоб урахувати вхідний бар'єр підсилювача та ділянку його не лінійності. При 100 ^{0}C одна термопара видає напругу 4.1мВ, чотири послідовно з'єднані термопарі будуть видавати 16.4 мВ.

У схемі на вході в підсилювач розташований терморезистор для компенсації температури повітря, і діод, щоб не переплутати полярність підключення термопар.

Експериментально вимірювались температури: окріп – 100 ^{0}C, колба галогенової лампи прожектора на 150Вт – 640 ^{0}C, полум'я газу – 950 ^{0}C, полум'я сірника – 1100 ^{0}C.

Електронний термометр створений з метою контролювати температуру печі. Може бути застосований для витримки п'єзокераміки або зразків заліза за певної температури.

УДК 621.793.7

Єршов А.В.[1], Лоскутов С.В.[2], Павлюк Є.О.[3]
[1] проф. НУ «Запорізька політехніка»
[2] проф. НУ «Запорізька політехніка»
[3] студ. гр. ІФ-313 НУ «Запорізька політехніка»

МЕХАНІЗМ АНІЗОТРОПІЇ КОГЕЗІЙНОЇ МІЦНОСТІ ПЛАЗМОВОГО ПОКРИТТЯ

Розглянемо дотичну і нормальну до поверхні основи когезійну міцність. Дотична міцність визначається як напруження руйнування покриття під дією дотичної сили, яка виникає при розтягнені або згинанні зразка. Дотична сила переважно діє на покриття при різанні, шліфуванні та як сила тертя при роботі машин та механізмів.

Модель зчеплення частинок за рахунок шару проміжних оксидів була обґрунтована у [1]. Вона полягає у плавленні поверхневих оксидів при формуванні покриття, оскільки було показано, що контактна температура на поверхні оксидного шару перевищує температуру його плавлення.

Для оцінки сили розриву покриття будемо уявляти, що воно має вигляд багатошарової цегельної стінки одиничної ширини. Частинки - це цеглини товщиною *h* та довжиною *L,* на стики яких накладено інші цеглини для зчеплення, рис.1.

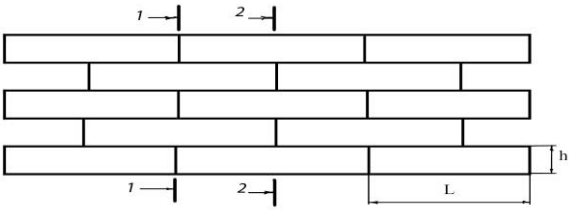


Рисунок 1. Модель плазмового покриття «цегляна стінка» для розрахунку когезійної міцності

На користь цієї схеми свідчить те, що при формуванні наступного шару покриття, частинки розташовуються переважно на стиках у заглибленнях попереднього шару. Когезійна міцність покриття у дотичному напрямку визначиться як відношення сили зчеплення частинок до товщини шару покриття, що дорівнює *nh*

$$\sigma_\tau = \sigma_n(\mathrm{n}-1)\,L/2\mathrm{n}\,h \qquad (1)$$

де σ_τ та σ_n дотична та нормальна когезійна міцність, *n*- кількість шарів частинок по товщині покриття, *h* – товщина частинок.

Нормальна міцність зони зчеплення, що визначена методом штифтової проби складає σ_n = 40 МПа. Результати розрахунків дотичної когезійної міцності наведені у табл. 1.

Таблиця 1. Залежність дотичної когезійної міцності від відносного видовження частинок *L/h* для *n* = 10 шарів покриття

L/h	8	10	12	14	16
σ_τ, МПа	144	180	216	252	288

Згідно табл.1 когезійна міцність покриття у поперечному до основи напрямку у 4-5 разів нижча ніж у продольному напрямку. Покриття характеризується суттєвою анізотропією. Виявлена значна відмінність між дотичною і

нормальною когезійною міцністю, що узгоджується з експериментальними даними. При випробуванні покриття на міцність зчеплення за змішаним характером відриву покриття визначається саме нормальна міцність оксидного шару на розрив.

Причина значної відмінності між дотичною і нормальною до основи когезійною міцністю криється у формі частинок та їх орієнтації відносно поверхні основи. Внаслідок деформації стиснення, частинки орієнтовані паралельно поверхні основи і мають форму дисків, діаметр яких у 10-15 разів перевищує їх товщину. При цьому площа зчеплення частинок, яка приходиться на одиницю площі поперечного перерізу при дії сили у дотичному напрямку буде у 4-5 разів більше ніж при зчепленні у нормальному до основи напрямку.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Лоскутов С.В., Єршов А.В., Зеленіна О.А. Вплив поверхневих оксидів на механізм адгезії покриття при плазмовому розпилюванні. Металофізика та нові технології. 2016. № 6, т.38. С. 839-851.

УДК 53.08:004.9:37.091.3

Сапронов І.І.[1], Татарчук Т.В.[2], Гуляева Л.В.[2]
[1] студ. гр. КНТ 523 НУ «Запорізька політехніка»
[2] доц. НУ «Запорізька політехніка»

МАЯТНИК ОБЕРБЕКА: РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАСОБУ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ МОМЕНТІВ ІНЕРЦІЇ

Сучасний етап розвитку освіти характеризується активною інтеграцією інформаційних технологій у навчальний процес природничих наук, зокрема фізики. Традиційні методи викладання дисциплін механічного циклу часто обмежуються теоретичними лекціями та лабораторними роботами в умовах очного навчання, що ускладнює доступ до експериментального матеріалу для студентів, які відсутні на заняттях або навчаються за дистанційною формою.

Впровадження веб-додатків у освітній процес дозволяє створити безпечне середовище для проведення віртуальних експериментів, де студенти можуть вивчати фізичні явища без необхідності використання складного та дорогого лабораторного обладнання. Особливої актуальності набуває розробка спеціалізованих програмних засобів для вивчення обертального руху та моменту інерції, оскільки ці теми є фундаментальними для підготовки інженерно-технічних кадрів.

Маятник Обербека як фізична система демонструє складну залежність між розподілом маси та динамікою обертального руху, що робить його ідеальним об'єктом для дослідження в рамках курсу класичної механіки. Розробка програмного інтерфейсу для роботи з цією системою дозволяє студентам не лише проводити розрахунки, а й візуалізувати вплив зміни параметрів на загальний момент інерції системи.

Мета дослідження: розробка веб-додатку для дистанційного навчання студентів фізичної кафедри, який забезпечує можливості виконання розрахунків моменту інерції маятника Обербека.

Завдання дослідження:

1. розробити математичну модель розрахунку моменту інерції;
2. проаналізувати вимоги до функціоналу освітнього веб-додатка;
3. реалізувати математичну модель розрахунку моменту інерції для системи маятника Обербека;
4. забезпечити інтерактивний користувальницький інтерфейс для введення параметрів фізичної системи;
5. впровадити механізми валідації та локалізації вхідних даних;

Теоретичні основи маятника Обербека

Маятник Обербека представляє собою обертовий механізм, який використовується для вивчення законів обертального руху та моменту інерції тіл. Конструктивно система складається з вертикальної осі обертання, на якій закріплено горизонтальні стержні, а також системи рухомих грузиків, положення яких може змінюватися вздовж стержнів.

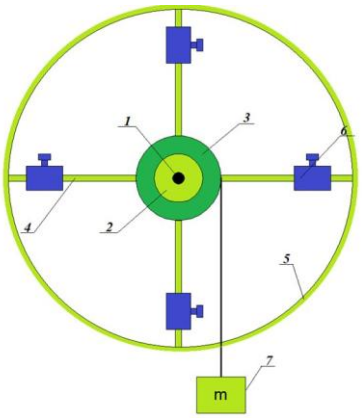


Рисунок 1 – Маятник Обербека являє собою хрестовину, що складається з чотирьох стрижнів 4, прикріплених до втулки 2, на вісь 1 якої надітий шків 3. На стрижні надіті вантажі 6 однакової маси. Стержні скріпленні обручем 5. На один із шківів намотується шнур з вантажем m (7).

Математична модель розрахунку

Загальний момент інерції системи маятника Обербека визначається як сума моментів інерції окремих компонентів:

$$I = I_1 + 4I_2 + 4I_3 + I_4$$

де: I_1 — момент інерції обруча; I_2 — момент інерції одного горизонтального стержня; I_3 — момент інерції одного вантажу; I_4 — момент інерції шківа.

При побудові математичної моделі прийнято наступні допущення:

1. Довжина стержнів значно перевищують їхні діаметри (l≫D), що дозволяє нехтувати вкладом у момент інерції від геометрії поперечного перерізу;
2. Маса розподілена рівномірно вздовж довжини стержнів та вантажів;
3. Тертям у підшипниках осі обертання можна знехтувати при розрахунках ідеальної моделі;
4. Деформації елементів конструкції за умов експерименту є незначними.

Таблиця 1 – Користувачеві надається можливість введення наступних величин:

Параметр	Опис	Одиничність вимірювання	Діапазон значень
M1	Маса обруча	кг	0,001 – 10
M2	Маса стержня	кг	0,001 – 10
M3	Маса вантажів	кг	0,001 – 10
M4	Маса шківа	кг	0,001 – 10
R1	Радіус обруча	м	0,1 – 1
R2	Довжина стержня	м	0,1 – 1
R3	Радіус осі обертання	м	0,001 – 0.01
R4	Зовнішній радіус шківа	м	0.01– 0.05
Y	Відстань вантажів від осі обертання	м	0.01 – 1

Реалізація веб-додатка

Для реалізації веб-додатка обрано платформу ASP.NET Core. Обґрунтування вибору включає наступні фактори:

1. Кросплатформність: можливість розгортання на різних операційних системах (Linux, Windows, macOS);
2. Висока продуктивність: використання асинхронної моделі введення/виведення та оптимізованого кешування;
3. Інтеграція з базами даних: підтримка Entity Framework Core для майбутнього розширення функціоналу;

4. Безпека: вбудовані механізми захисту від типових веб-вразливостей (XSS, CSRF).

Основною функцією веб-додатка є надання користувачеві зручного інтерфейсу для введення фізичних параметрів системи маятника Обербека. Форма розроблена з використанням Bootstrap фреймворку, що забезпечує адаптивність відображення на пристроях різного розміру екрану (десктопи, планшети, мобільні телефони).

Всі числові поля мають вбудовану валідацію на тип даних (integer/decimal), що запобігає введенню недопустимих символів.

Система валідації реалізована на двох рівнях:

1. Клієнтська валідація: здійснюється безпосередньо у браузері за допомогою JavaScript-бібліотеки jQuery Validation, що забезпечує миттєве реагування на помилкові введення та покращує користувацький досвід.

2. Серверна валідація: виконується на рівні контролера перед передачею даних у сервісний шар, що гарантує цілісність обчислень навіть за умови обходу клієнтських перевірок.

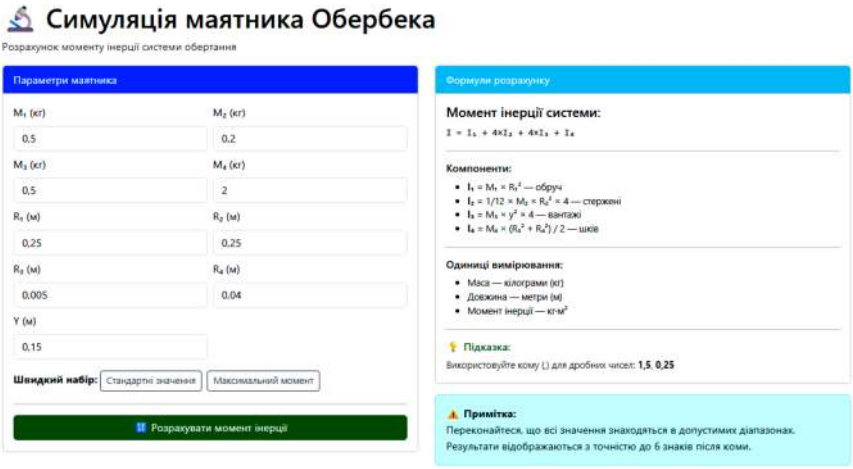


Рисунок 2 – Приклад інтерфейсу розробленого веб-сайту

Механізми валідації перевіряють наступні умови:

1. додатність всіх геометричних параметрів (M1, M2, M3, M3, R1, R2, R3, R4, Y);
2. невід'ємність мас усіх компонентів системи (Mi≥0 для всіх i=1,2,3,4);
3. відсутність переповнення при обчисленні квадратів великих чисел;

4. уникнення ділення на нуль під час виконання математичних операцій.

При виявленні помилок система формує повідомлення про помилки, які відображаються безпосередньо над відповідними полями форми та у верхній частині сторінки.

Для спрощення роботи користувачів та стандартизації експериментальних умов реалізовано функцію завантаження пресетів (збережених наборів параметрів). Пресети відповідають типовим конфігураціям маятника Обербека, які використовуються у навчальному процесі фізичних кафедр.

Дана функція дозволяє студентам швидко перейти до розрахунків без необхідності ручного введення всіх параметрів, а також слугує орієнтиром для правильних діапазонів значень.

Після введення даних та успішного виконання валідації система переходить до етапу обчислення моменту інерції. Результати відображаються на окремій сторінці (Result.cshtml), що містить:

1. детальну розбивку внеску кожного компонента системи в загальний момент інерції;
2. загальне значення моменту інерції з точністю до 6 знаків після коми;



Рисунок 3 – Приклад результатів розрахунку веб-сайту

Освітні аспекти застосування

Веб-додаток може бути інтегрований у різні форми організації освітнього процесу:

1. Лабораторні заняття: підготовка студентів до проведення експерименту на реальному обладнанні, дозволяє перевірити гіпотетичні результати та зрозуміти фізичну суть явища;

2. Самостійна робота поза аудиторією: доступність 24/7 дозволяє студентам опрацьовувати матеріал у власному темпі, що особливо важливо для дистанційного навчання;

3. Змішане навчання: поєднання очних занять з використанням вебресурсів, де додаток слугує інструментом віртуального експериментування.

Використання розробленого веб-симулятора має низку переваг порівняно з класичними підходами:

1. Доступність: можливість роботи з будь-якого пристрою, що має сучасний веб-браузер;

2. Відсутність необхідності встановлення додаткового ПЗ: не потрібно встановлювати спеціалізоване програмне забезпечення на локальний комп'ютер студента;

3. Миттєвий розрахунок результатів: виключається можливість арифметичних помилок при ручному обчисленні, що дозволяє зосередитися на фізичній суті задачі;

4. Візуалізація та структурованість: результати подаються у вигляді чітко структурованих звітів, що спрощує їх використання при підготовці лабораторних робіт.

Можливості подальшого розвитку системи

Заплановані напрямки вдосконалення веб-додатка:

1. Додавання графічної візуалізації: інтеграція SVG або Canvas для відображення схеми маятника у реальному часі зі змінними параметрами;

2. Інтеграція з лабораторним обладнанням: можливість порівняння розрахункових даних із експериментальними вимірюваннями на фізичному макеті маятника Обербека;

3. Розширення функціоналу для інших фізичних систем: адаптація архітектури для симуляції інших об'єктів (маятники, обертові диски, гіроскопи тощо);

4. Розширена статистика та аналітика: відстеження активності користувачів для покращення навчального процесу на основі даних.

Висновки

1. У результаті проведеного дослідження розроблено веб-симулятор маятника Обербека, який забезпечує ефективний інструмент для вивчення моменту інерції фізичної системи. Основні результати роботи можна сформулювати у наступних тезах:

2. Функціональна готовність: розроблений веб-додаток повністю реалізує математичну модель розрахунку моменту інерції з урахуванням усіх компонентів системи, забезпечуючи точність обчислень до 6 знаків після коми.

3. Технологічна вибір: використання платформи ASP.NET Core дозволило створити масштабований та кросплатформний додаток з високою продуктивністю та надійністю роботи в умовах одночасного доступу кількох користувачів.

4. Освітня цінність: інтеграція валідації, пресетів типових параметрів та структурованого звітування спрощує роботу студентів з різними рівнями підготовки, забезпечуючи доступність матеріалу для самостійного опрацювання.

5. Масштабованість: архітектура проекту передбачає можливість подальшого розширення функціоналу та інтеграції з іншими освітніми системами, що робить його перспективним засобом для створення комплексної платформи дистанційного навчання фізики.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Савельєв І. В. Курс загальної фізики: у 3 т. — М.: Наука, 2018. — Т. 1. Механіка. — 560 с.

2. Microsoft Corporation. ASP.NET Core Documentation. URL: https://learn.microsoft.com/aspnet/core/ (дата звернення: 2024).

3. Bootstrap Documentation. URL: https://getbootstrap.com/docs/ (дата звернення: 2024).

Наукове електронне видання
Можна використовувати в локальному та
мережному режимах

ТИЖДЕНЬ НАУКИ-2026
Електротехнічний факультет

Збірник тез доповідей щорічної
науково-практичної конференції серед студентів,
викладачів, науковців, молодих учених і аспірантів

13–17 квітня 2026 року

Один електронний оптичний диск (DVD-ROM); супровідна документація.
Тираж 100 прим. Зам. № 494

Видавець і виготовлювач
Національний університет «Запорізька політехніка»
Україна, 69063, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 64
Тел.: (061) 769–82–96, 220–12–14

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6952 від 22.10.2019.