

ОКЕУ-2025



**ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ
ЕЛЕКТРОУСТАНОВКАМИ
(ОКЕУ-2025)**

**Матеріали VI міжнародної науково-технічної
конференції
22-23 жовтня, 2025 р.**

Збірник наукових праць

Вінниця, Україна

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет
Інститут електродинаміки Національної академії наук України
Інститут відновлюваної енергетики Національної академії наук України
Державне підприємство НАЕК «Енергоатом»
Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського"
Національний університет «Львівська політехніка»
Секція «Україна» Міжнародного інституту IEEE
Луцький національний технічний університет
Українське ядерне товариство
Технічний університет Молдови, м. Кишинів
Університет м. Дуала, Республіка Камерун
Університет м. Дананг, В'єтнам
Алматинський університет енергетики і зв'язку, м. Алмати, Республіка Казахстан
Технічний університет «Люблинська політехніка», Польща
Tafila Technical University, Jordan
National Institute of Technology, Delhi, India
University of East Sarajevo, East Sarajevo, Bosnia and Herzegovina
CVR College of Engineering Mangalpalli, Hydera-bad, India
University of West Bohemia, Plzen (Czech republic)
Рада молодих учених при Міністерстві освіти і науки України

ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОУСТАНОВКАМИ (ОКЕУ-2025)

Матеріали VI Міжнародної науково-технічної
конференції

22-23 жовтня 2025 року

Збірник наукових праць

Електронне наукове видання

Вінниця
ВНТУ
2025

УДК 621.316.1

О-62

Видається за рішенням Вченої ради Вінницького національного технічного університету
Міністерства освіти і науки України

Редакційна колегія: В. Біліченко, доктор технічних наук, професор
І. Єпіфанова, доктор економічних наук, професор
В. Комар, доктор технічних наук, професор

Рецензенти: В. Тептя, к.т.н., доцент
О. Рубаненко, к.т.н., професор

О-62 **Оптимальне** керування електроустановками (ОКЕУ- 2025). Матеріали VI
Міжнародної науково-технічної конференції, 22-23 жовтня 2025 року : збірник
наукових праць [Електронний ресурс]. – Вінниця : ВНТУ, 2025. - (PDF, 267 с.)

ISBN 978-617-8163-64-8

Збірник містить Матеріали VI МНТК за такими основними напрямками: методи і засоби оптимального керування електроустановками, електромеханічні системи, електротехнічні комплекси та керування ними, електротехнологічні процеси й енергозбереження.

Роботи подаються в авторській редакції. Редакційна колегія не несе відповідальності за достовірність інформації, яка наведена в роботах, та залишає за собою право не погоджуватися з думками авторів на розглянуті питання.

УДК 621.316.1

ISBN 978-617-8163-64-8

© Вінницький національний технічний
університет, укладання, оформлення, 2025

ЗМІСТ

СЕКЦІЯ 1. МЕТОДИ І ЗАСОБИ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОУСТАНОВКАМИ	13
Черкашина В. В. Доцільність уніфікації параметричного ряду перерізів проводів повітряних ліній 10 кВ. <i>НТУ «Харківський політехнічний інститут»</i>	13
Milan Belik, Olena Rubanenko Smart Control of Trombe Wall Systems for Sustainable Reconstruction in Ukraine. <i>University of West Bohemia in Pilsen, Pilsen, Czech Republic, Vinnytsia National Technical University</i>	15
Milan Belik, Olena Rubanenko Optimization of Photovoltaic System Modernization for University Energy Supply Efficiency. <i>University of West Bohemia in Pilsen, Pilsen, Czech Republic, Vinnytsia National Technical University</i>	17
Гай О.В., Гай Г.А. Аналіз впливу конфігурації електричної мережі на втрати електричної енергії на корону. <i>НЕК Укренерго, Національний університет біоресурсів і природокористування України</i>	19
Буткевич О. Ф., Кравченко А. Р. Електрозабезпеченням споживачів агрегованих мікромереж: ситуативний аспект. <i>Інститут електродинаміки НАН України, НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»</i>	21
Гай О.В., Блінов І.В., Ворущило А.О., Гай Г.А. Оптимізація кількості різнорідних засобів підвищення надійності електропостачання споживачів в системах розподілу з урахуванням інвестиційних обмежень на їх встановлення. <i>Інститут електродинаміки НАН України, Інститут загальної енергетики НАН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України</i>	22
Бардик Є. І., Бондаренко О. Л., Заклюка І. В. Пріоритизація виведення з експлуатації комутаційного обладнання для зниження ризику порушень нормального режиму роботи ЕЕС. <i>НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»</i>	25
Бардик Є. І., Болотний М. П., Бондаренко О. Л. Предиктивний аналіз технічного стану електрообладнання в електроенергетичних системах. <i>НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»</i>	27
Гадай А.В., Денисовець Т.М. Моделювання розподільної мережі низької напруги з розосередженими джерелами енергії. <i>Луцький національний технічний університет</i>	29

Денисюк С.П., Белоха Г.С. Особливості побудови коміркових електроенергетичних систем. <i>Інститут електродинаміки НАН України, НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»</i>	31
Белоха Г.С. Побудова децентралізованих локальних електроенергетичних систем за концепцією транзактивної енергії. <i>НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»</i>	33
Кучанський В.В., Зайцев Є.О. Оцінювання втрат активної потужності від коронного розряду в повітряних лініях електропередавання та їх вплив на резонансні перенапруги. <i>Інститут електродинаміки НАН України</i>	35
Кузнецов В. Г., Кучанський В.В., Тугай Ю.І., Тугай І.Ю. Оцінювання впливу залишкового намагнічування автотрансформатора на умови розвитку резонансних перенапруг. <i>Інститут електродинаміки НАН України</i>	36
Тугай Ю.І., Шевчук В.В., Кучанський В.В. Вдосконалене керування віртуальним синхронним генератором для паралельних інверторів у мікромережах. <i>Інститут електродинаміки НАН України</i>	38
Дерев'янка Д. Г., Белоха Г.С. Особливості архітектури коміркових локальних електроенергетичних систем критичної інфраструктури з джерелами розосередженої генерації. <i>НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»</i>	39
Яндульський О.С., Гулий В.С., Марченко А. А., Тимохін О. В., Нестерко А. Б. Дослідження динамічних режимів роботи ТЕС при регулюванні частоти та активної потужності в енергосистемі. <i>НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»</i>	41
Кацадзе Т. Л., Лугін Д. М. Дослідження можливості переведення міждержавної електропередачі Західноукраїнська-Саболчбака на номінальну напругу 400 кВ <i>НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»</i>	43
Кацадзе Т. Л., Баженов В. А., Буслова Н. В., Янковська О. М., Новіков К. М. Динамічна модель зарядної ємності магістральних ліній електропередачі з урахуванням метеорологічних факторів. <i>НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»</i>	45
Кацадзе Т. Л., Щербина Д. В. Балансування режимів електричної мережі із застосуванням гравітаційних систем накопичення енергії. <i>НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»</i>	48
Чижевський В. В., Франчук Н. І., Троценко Є. О., Нестерко А. Б. Оптимізація режимів роботи трансформаторів з РПН із застосуванням керованих установок компенсації реактивної потужності. <i>НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», ПрАТ "ДТЕК Київські електромережі"</i>	51

Бевз С.В., Бурбело С.М., Федяєв О.Л. Репрезентація методу вузлових напруг на основі методології рівноважного балансування. <i>Житомирський військовий інститут імені С.П. Корольова</i>	52
Бардик Є. І., Коваль Я. С. Комплексна модель прогнозування залишкового ресурсу масляних силових трансформаторів з урахуванням синергетичних факторів старіння. <i>НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»</i>	54
Бардик Є. І., Бондаренко О. Л., Заклюка І. В. Сегментація парку обладнання методами кластерного аналізу. <i>НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»</i>	56
Максимук О. І. Моделювання режимів регулювання реактивної потужності інверторів фотоелектричних станцій. <i>Національний університет «Львівська політехніка»</i>	58
Кошман В. І., Сабарно Л.Р., Севастюк І.М. Розробка принципів виявлення обриву проводу у трифазній розподільній мережі. <i>Інститут електродинаміки НАН України</i>	61
Михайліченко О.В., Янко А.С., Лактіонов О.І. Аналіз енергоефективності мобільних робототехнічних платформ і безпілотних літальних апаратів у гібридних мережах. <i>Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»</i>	62
Дмитренко О.О. Централізовані та децентралізовані системи релейного захисту. <i>НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»</i>	64
Сподинський О.В., Михайлевський О.С. Реконструкція протиаварійної автоматики енерговузла західного регіону. <i>Інститут електродинаміки НАН України</i>	66
Кулик В. В., Затхей М. В. Особливості використання рекурентних нейронних мереж для оперативного прогнозування виробництва енергії фотоелектричними станціями. <i>Вінницький національний технічний університет</i>	68
Андрушко С. Л., Кулик В. В. Автоматизована система синхронізації генератора локальної енергосистеми з системою централізованого електропостачання. <i>Вінницький національний технічний університет</i>	71
Лиса Т.О. Підвищення енергоефективності ВДЕ в балансі електроенергії локальних електроенергетичних систем. <i>Вінницький національний технічний університет</i>	74
Лисий В.М. Визначення частки втрат електроенергії в електричних мережах, які викликані відновлюваними джерелами енергії. <i>Інститут відновлювальної енергетики НАН України</i>	77

Залізняк М.П., Нетребський В.В. Огляд сучасних методів оптимізації в задачах балансування та керування режимами електроенергетичних систем. <i>Вінницький національний технічний університет</i>	79
Лежнюк П. Д., Затхей К. О. Децентралізовані енергетичні ресурси як спосіб оперативного керування балансом електроенергії в електричній системі з відновлюваними джерелами енергії. <i>Вінницький національний технічний університет</i>	82
Хороший Я. О. Застосування засобів теорії подібності для впровадження відновлювальних джерел енергії. <i>Вінницький національний технічний університет</i>	86
Повстянко О. О., Тептя В. В. Стійкість енергосистеми з розподіленою генерацією. <i>Вінницький національний технічний університет</i>	87
Пограничний Б. П., Рубаненко О. Є. Захист повітряних ліній електропередач 10–110 кВ від подвійних замкнень. <i>Вінницький національний технічний університет</i>	89
Глущенко І.В., Малогулко Ю.В. Порівняльна характеристика втрат потужності у повітряних та кабельних лініях електропередавання. <i>Вінницький національний технічний університет</i>	91
Затхей К.О., Сікорська О.В., Малогулко Ю.В. Енергетична безпека України: комплекс заходів для підвищення надійності та ефективності електромереж. <i>Вінницький національний технічний університет</i>	95
Буток К.А., Рубаненко О.Є. Релейний захист та автоматика системи безперервного живлення власних потреб АЕС. <i>Вінницький національний технічний університет</i>	99
Лежнюк П.Д., Ластівка В.Б. Віртуальні електростанції як інноваційна концепція для агрегації ВДЕ. <i>Вінницький національний технічний університет</i>	101
Глущенко І. В., Лесько В. О., Юхимчук М.С., Климчук О. В. Алгоритми оптимального керування мікромережами в умовах децентралізованої енергетики. <i>Вінницький національний технічний університет</i>	104
Лежнюк П. Д., Луців П. Д., Остра Н. В. Аналіз моделі оперативного управління технологічними витратами електричної енергії в електророзподільчій системі. <i>Вінницький національний технічний університет</i>	107

Лежнюк П. Д., Луців П. Д., Остра Н. В.	110
Концептуальна модель системи розподілу електричної енергії, як об'єкта управління технологічними втратами електроенергії. <i>Вінницький національний технічний університет</i>	
Насадюк Р. М., Комар В. О.	113
Системи керування попитом: аналіз сучасних технологій та перспективи впровадження в локальних електроенергетичних системах України. <i>Вінницький національний технічний університет</i>	
Вихристюк В. В., Сікорська О. В.	116
Використання технологій SMART GRID для оптимізації режимів електричних мереж в умовах воєнного часу. <i>Вінницький національний технічний університет</i>	
 Секція 2. ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ СИСТЕМИ, ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ КОМПЛЕКСИ ТА КЕРУВАННЯ НИМИ	120
Слинько В.М., Любич М.О.	120
Послуги з високоточного контролю метрологічних характеристик та вимірювання електричних величин. <i>Інститут електродинаміки НАН України, ТОВ ЕТІН</i>	
Степанчиков Д.М., Колесник К.А.	122
Оптимізація моніторингу запиленості поверхні фотоелектричних модулів сонячних електростанцій. <i>Херсонський національний технічний університет</i>	
Юхимчук М.С., Стрембіцький П.О., Перепелиця С.В., Лесько В.О.	
Аналіз стійкості та оптимізація автоматизованих систем регулювання напруги в електроенергетиці <i>Вінницький національний технічний університет</i>	123
Мокін Б.І., Мокін О.Б., Пасєка Б.В.	125
Математичні моделі оптимального руху електромобіля з асинхронним електроприводом за наявності на дорозі спусків, підйомів і населеного пункту. <i>Вінницький національний технічний університет</i>	
Ткачук О. В., Лесько В. О., Юхимчук М. С., Климчук О. В., Горчук Ю. А.	127
Автоматизовані системи релейного захисту малих ГЕС у контексті цифровізації енергетики. <i>Вінницький національний технічний університет</i>	
Падалко А. М., Падалко Н. Й., Собчук Д.С., Костючик О. І.	129
Дослідження керування споживанням електроенергії в асинхронному двигуні з короткозамкнутою обмоткою. <i>Луцький національний технічний університет</i>	
Кульбашна Н. І., Далека В. Х., Лукашова Н. П.	131
Технології ефективного використання фотоелектричних панелей на даху електробусів. <i>Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова</i>	
Іскра Б.І., Паянок О.А.	134
Автоматизоване управління мережевою архітектурою сонячної фотоелектричної станції з системами зберігання енергії. <i>Вінницький національний технічний університет</i>	

Тимків З.О., Паянок О.А. Застосування програмних середовищ для підвищення ефективності автоматизованої системи управління технологічним процесом сушки зерна. <i>Вінницький національний технічний університет</i>	137
Бойко С., Жуков О., Іщенко В. Особливості впровадження відновлювальних джерел енергії до системи електропостачання літальних апаратів. <i>Національний Університет «Запорізька політехніка», Вінницький національний технічний університет</i>	140
Жуков О., Килавчук О. До питання оцінки коефіцієнта використання встановленої потужності відновлюваних джерел енергії. <i>Вінницький національний технічний університет</i>	142
Жуков О., Бойко С., Гурківський В. Моделювання електроприводу електромобіля з урахуванням динамічних втрат. <i>Вінницький національний технічний університет, Національний Університет «Запорізька політехніка»</i>	144
Яремак І. І. Модель системи керування насосною станцією на засадах теорії електричних кіл. <i>Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу</i>	147
Дідушок О., Бомбик В. Застосування методів штучного інтелекту та машинного зору для діагностування вакуумних вимикачів <i>Відокремлений структурний підрозділ «Вінницький фаховий коледж Національного університету харчових технологій», Вінницький національний технічний університет</i>	149
Осельський О.В., Кухарчук В.В. Використання вібромоніторингу для адаптивного керування електромеханічними установками. <i>Вінницький національний технічний університет</i>	151
Сівохін С.Д., Нанака О.М., Паянок О.А. Вдосконалення системи керування електроприводом мостового крану із врахуванням коливань вантажу. <i>Вінницький національний технічний університет</i>	155
Коваль А. М., Машуков М. Ю., Коваль Т. М. Механічні характеристики синхронного двигуна в пускових асинхронних режимах. <i>Вінницький національний технічний університет</i>	157
Грабко Вал.В., Ощепков В.С. До питання оцінки стану ізоляції ротора працюючого турбогенератора тепловізійними методами. <i>Вінницький національний технічний університет</i>	161
Грабко Вал. В., Козаченко Б.В. Про один спосіб регулювання напруги силовим трансформатором з пристроєм регулювання під навантаженням. <i>Вінницький національний технічний університет</i>	163

Химич В.В., Рубаненко О.Є. Підвищення якості фотоелектричних трекерів з фотоелектричними панелями. <i>Вінницький національний технічний університет</i>	165
Проценко Д. П. Автоматизована система збору даних генерації електроенергії сонячних батарей. <i>Вінницький національний технічний університет</i>	170
Курляк П.О., Бацала Я.В., Федорів М.Й. Моделювання впливу несинусоїдної напруги живлення на режими роботи асинхронного електроприводу. <i>Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу</i>	173
Коритний А.В., Бомбик В.С. Електромеханічна система керування сонячної фотоелектричної станції. <i>Вінницький національний технічний університет</i>	176
Ведміцький Ю. Г. Про тривіальний характер інваріантності передатної функції відносно функції вхідної дії. <i>Вінницький національний технічний університет</i>	178
Ведміцький Ю. Г., Стадник Є. Г., Іващенко І. О., Радченко І. М. Спектральний аналіз силового процесу за двосторонньої широтно-імпульсної модуляції. Узагальнений аналітичний підхід. <i>Вінницький національний технічний університет</i>	180
Курилко Н. В., Федоришин Р. М. Методологія швидкої ідентифікації динамічних моделей вітрових електростанцій. <i>Національний університет «Львівська політехніка»</i>	182
Далека В. Х., Фуртат С. О., Величко А. С. Перспективи електричного транспорту з використанням кремнієвих батарей. <i>Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, Київський фаховий коледж міського господарства Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського,</i>	184
Федів Є. І., Сівакова О. М. Декомпозиція повної потужності в електричних мережах за несинусоїдальних умов. <i>Національний університет «Львівська політехніка»</i>	187
Савченко Н. П., Довгальок О. М., Трет'як А. В. Побудова мікромереж з додатковою генерацією від мобільних електростанцій на базі відновлюваних джерел енергії. <i>Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»</i>	192
Сліденко М. О., Тептя В. В., Олійник Ю. О. Статистика пошкоджень силових трансформаторів. <i>Вінницький національний технічний університет</i>	194

Чугунов Д.В., Нізімов В.Б. Математичний опис синхронного двигуна з ємнісним накопичувачем енергії у контурі збудження у фазній системі координат. <i>Дніпровський державний технічний університет</i>	198
Фаренюк А. М., Жуков О.А. До питання проектування електроприводу перонного автобуса на електротязі. <i>Вінницький національний технічний університет</i>	202
Фаренюк А. М., Жуков О.А. Підвищення енергоефективності тягового електропривода автономного транспортного засобу. <i>Вінницький національний технічний університет</i>	205
Юрченко О.Ю., Сіренко Ю.В., Мукоріз А. І. Аналіз електрофізичних способів передпосівної обробки насіння. <i>Сумський національний аграрний університет</i>	207
Юрченко О.Ю., Сіренко Ю.В., Мукоріз А. І. Результати досліджень впливу імпульсного електричного поля на насіння озимої пшениці. <i>Сумський національний аграрний університет</i>	209
СЕКЦІЯ 3. ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ Й ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ	211
Омеляненко Г. В., Макаров А. О. Статистичний аналіз параметрів проводів повітряних ліній 10 кВ. <i>НТУ «Харківський політехнічний інститут»</i>	211
Лебедь Д. Ю. Схема електронного таймера із затримкою ввімкнення реле на базі NE555 з оптоізоляцією виходу. <i>Вінницький національний технічний університет</i>	213
Варський Г.М., Тутик В.Л. Моніторинг в системах електропостачання залізниць. <i>Інститут електродинаміки НАН України</i>	216
Кулик В. В., Поліщук А.Л. Робастна оптимізація потоків реактивної потужності у розподільних мережах на основі ідеального струморозподілу. <i>Вінницький національний технічний університет</i>	218
Коменда Н.В., Волинець В.І. Управління енергоспоживанням на основі технології промислового інтернету речей. <i>Луцький національний технічний університет</i>	221
Волинець В.І., Романюк М.В., Коменда Н.В. Дослідження ефективності використання електроенергії вугільних шахт. <i>Луцький національний технічний університет</i>	223
Бахор З. М., Яцейко А. Я. Вдосконалення системи зриву ферорезонансних процесів в електромережах 10 кВ. <i>Національний університет «Львівська політехніка»</i>	225

Лещенко С.П., Маляренко О.С., Пехота В.М. Сучасні вимоги та можливості автоматизації резервних дизель-електричних агрегатів і агрегатних приміщень. <i>Харківський національний університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба, Науково-виробничо-монтажне підприємство “Зв’язокЕнергоСервіс”</i>	227
Давиденко Л.В. Стратегії управління попитом для реалізації завдань енергетичного переходу. <i>Луцький національний технічний університет</i>	229
Давиденко Л.В., Давиденко В.В. Фреймворк WEB-додатку для торгівлі електроенергії з інтеграцією технологій блокчейн та інтернету речей. <i>Луцький національний технічний університет</i>	231
Соломчак О.В., Николайчук М.Я., Соломчак А.О. Підвищення ефективності керування STATCOM у мережах із СЕС на основі інтеграції SIMATIC ENERGY SUITE та SENTRON PAC4200. <i>Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу</i>	234
Пасека А. В., Кравець І. П. Шляхи зменшення витрат електричної енергії промислових підприємств. <i>Львівський державний університет безпеки життєдіяльності</i>	237
Сидорець А. С., Кравець І. П. Оптимізація режимів роботи електротехнічних установок для зменшення енергоспоживання. <i>Львівський державний університет безпеки життєдіяльності</i>	239
Добровольська Л.Н., Куць Н.Г., Собчук Д.С. Гібридні системи електропостачання з відновлювальними джерелами енергії. <i>Луцький національний технічний університет</i>	241
Бабенко О.В. Закономірності керування STATCOM за зміни потужності фотоелектричних станцій. <i>Вінницький національний технічний університет</i>	243
Кутіна М. В., Руденко О. І., Дяченко А. В. Підвищення точності визначення залишкового ресурсу силового електрообладнання підстанцій. <i>Вінницький національний технічний університет</i>	246
Гуцал В.С., Бабенко О.В., Захаров В.В. Система SMART GRID як інструмент управління при інтеграції та паралельній роботі ВДЕ і УЗЕ з розподільчою мережею. <i>Вінницький національний технічний університет</i>	248
Шулле Ю.А. Двосторонні сонячні панелі – переваги використання. <i>Вінницький національний технічний університет</i>	250
Самсонюк Д.Ю., Сікорська О.В. Експлуатаційні виклики та властивості установок збереження енергії в Україні. <i>Вінницький національний технічний університет</i>	252

Томляк В. В.	255
Перехідні процеси та стійкість енергосистеми при коротких замиканнях.	
<i>Вінницький національний технічний університет</i>	
Николин У.М., Николин П.М.	257
Розроблення прикладного застосування для аналізу впливу ВДЕ на сільські електромережі	
<i>Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу</i>	
Гресько А.О., Тептя В.В.	259
Аналіз завдань та засобів захисту розподільних установок.	
<i>Вінницький національний технічний університет</i>	
Кочмарук В. О., Комар В.О., Нетребський В. В.	261
Вплив децентралізованих систем електропостачання на зниження втрат електроенергії в розподільних мережах.	
<i>Вінницький національний технічний університет</i>	
Лашенко Ю.В., Вишневський С.Я.	264
Аналіз впливу відновлювальних джерел енергії та систем накопичення енергії на стійкість об'єднаної енергосистеми України.	
<i>Вінницький національний технічний університет</i>	

СЕКЦІЯ 1

МЕТОДИ І ЗАСОБИ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОУСТАНОВКАМИ

УДК 621.315.22:620.1

В. В. Черкашина

ДОЦІЛЬНІСТЬ УНІФІКАЦІЇ ПАРАМЕТРИЧНОГО РЯДУ ПЕРЕРІЗІВ ПРОВОДІВ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ 10 кВ

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» (НТУ «ХПІ»), м. Харків,
Україна

Вибір струмопровідної частини повітряних ліній (ПЛ) 10 кВ виконується під час проектування електричних мереж (ЕМ) за умови, що значення площі перерізу проводу відповідає економічному інтервалу навантажень, за якого дисконтовані витрати будуть мінімальні, та перевіряється за допустимою втратою напруги. Також під час проектування враховується зміна параметрів ПЛ 10 кВ протягом експлуатації. І якщо обраний провід не задовольняє вимогі допустимої втрати напруги, то його переріз збільшують. Такий підхід до вибору перерізів проводів ПЛ 10 кВ під час проектування збільшує обсяг роботи проектувальника та сприяє вибору проводу більшого перерізу.

Враховуючи умови виробу і перевірки перерізів проводів ПЛ 10 кВ, має сенс уніфікувати існуючий параметричний ряд перерізів проводів даного класу напруги.

Для реалізації цього завдання використано існуючу техніко-економічну модель дисконтних витрат (B_i) ПЛ [1]. Основна відмінність моделі ПЛ 10 кВ від моделей ПЛ 110 – 750 кВ [1] полягає у зміні аналітичного зв'язку інвестицій у ПЛ із перерізом проводу (F):

$$B_i = (E + p)(a + vF) + (3I^2 \rho \tau \beta) \times F^{-1}, \quad (1)$$

де E - банківська ставка, %; p - коефіцієнт відрахувань на амортизацію, ремонт та обслуговування лінії; a - постійна складова вартості 1 км ПЛ, яка залежить від типу опор, конструктивного виконання ПЛ, класу напруги, грошові одиниці (г.о)/км; v - коефіцієнт подорожчання, що враховує зміну вартості 1 км ПЛ залежно від перерізу проводу, нормованого у відповідному класі напруги, г.о./ (км · мм²); F - переріз проводу, мм²; I - максимальний струм лінії, А; ρ - питомий опір провідникового матеріалу, Ом·мм²/км; τ - час максимальних втрат, рік/год; β - питома вартість втрат електроенергії, г.о/(кВт·год).

Зважаючи на те, що техніко-економічні моделі ПЛ з точки зору теорії подоби є подібними, тоді відношення попередніх дисконтованих витрат до наступних у рамках одного параметричного ряду будуть тотожні, що є необхідною умовою побудови параметричного ряду перерізів проводів ПЛ.

Відповідно до теорії подоби для пошуку оптимального параметричного ряду використано критеріальний метод, який дозволив уникнути невизначеності вихідної інформації [2]. Для цього техніко-економічну модель ПЛ (1) записано в критеріальній формі:

$$B_* = \pi_1 F_*^{0,25} + \pi_2 F_*^{-1} \quad (2)$$

та проаналізовано для обґрунтування зміни аналітичного зв'язку інвестицій з перерізом проводу F_0 в умовних одиницях (у.о.):

$$F_0 = \left(\frac{\pi_1 F_2}{\pi_2 F_1} \right)^{0,8}, \quad (3)$$

де $\pi_1=4/5$, $\pi_2=1/5$ - критерії подібності, визначені із систематичних процедур критеріального методу.

Аналіз критеріальним методом показав, що залежно від похибки вихідної інформації (δ) можна отримати коефіцієнт наростання (K) параметричного ряду перерізів проводів ПЛ 10 кВ задаючись тим чи іншим значенням. Результати досліджень представлено у табл. 1

Таблиця 1–Результати обґрунтування коефіцієнта наростання параметричного ряду перерізів проводів ПЛ 10 кВ

$\delta, \%$	5	6	7	8	9	10
K	1.34	1.58	0.19	1.91	2.07	2.26

Як слідує з табл. 1, на значення коефіцієнта наростання параметричного ряду перерізів проводів ПЛ 10 кВ впливає похибка δ і найбільш прийнятний коефіцієнт $K \approx 2$. А на сьогодні діючий коефіцієнт наростання параметричного ряду перерізів проводів ПЛ 10 кВ становить - $K \approx 1,46$ і кількість перерізів проводів – 7 [3]. У разі застосування пропонуємого коефіцієнту наростання параметричного ряду число проводів буде становити 3 переріза.

Зменшення кількості перерізів проводів дозволить прискорити процес проектування і оптимізувати вибір струмопровідної частини ліній, що позитивно відобразиться на техніко-економічних характеристиках ЕМ.

Висновок

Проведені дослідження обґрунтовують доцільність уніфікації параметричного ряду перерізів проводів повітряних ліній 10 кВ для спрощення процесу проектування електричних мереж і оптимізації вибору струмопровідної частини ліній, що в сукупності покращить техніко - економічні характеристики мереж.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1]. Черкашина В.В. Структурування повітряних ліній електропередачі в умовах неповноти інформації : монографія. – Харків: Факт, 2016. – 160 с.
- [2]. Лежнюк П.Д., Бевз С.В. Методи оптимізації в електроенергетиці. Критеріальний метод. – Вінниця: ВДТУ, 1999. – 176 с.
- [3]. Олійник В.С., Гайдук В.М., Гончар В.Ф. та ін. Довідник сільського електрика / за ред.В. С. Олійника. - 3-тє вид., перероб. і допов. - К.:Урожай,1989.-264 с. - режим доступу: <https://forca.com.ua/knigi/rizne/dovidnik-sil'skogo-elektrika.html>

Черкашина Вероніка Вікторівна – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри передачі електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5639-9722>; e-mail: veronika2473@gmail.com

Cherkashyna Veronika Viktorivna – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Electrical Energy Transmission, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5639-9722>; e-mail: veronika2473@gmail.com

SMART CONTROL OF TROMBE WALL SYSTEMS FOR SUSTAINABLE RECONSTRUCTION IN UKRAINE

¹University of West Bohemia in Pilsen, Pilsen, Czech Republic

²Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine

³Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyev, Ukraine

Abstract

This paper presents the concept, modeling, and validation of a smartly controlled Trombe wall system designed for low-cost, energy-efficient buildings in the context of Ukraine's sustainable post-war reconstruction. Combining passive solar architecture with intelligent thermal management, the proposed system integrates sensor-based control of ventilation flaps and adaptive prediction algorithms for optimizing indoor comfort and minimizing auxiliary heating demand. Using a combination of experimental data and COMSOL Multiphysics simulations, the study demonstrates how digital control can enhance the traditional Trombe wall's performance under diverse climatic and operational conditions.

Keywords: passive solar system, modernization, Trombe wall.

Анотація

Представлено концепцію, моделювання та валідацію інтелектуально керованої системи стіни Тромбе, розробленої для маловитратних та енергоефективних будівель у контексті сталого післявоєнного відновлення України. Поєднуючи принципи пасивної сонячної архітектури з інтелектуальним керуванням тепловими потоками, запропонована система інтегрує датчикове керування вентиляційними заслінками та адаптивні алгоритми прогнозування для оптимізації мікроклімату приміщень і мінімізації потреби в додатковому опаленні. Використовуючи комбінацію експериментальних даних і моделювання в середовищі COMSOL Multiphysics, дослідження демонструє, як цифрове керування може підвищити ефективність традиційної стіни Тромба за різних кліматичних та експлуатаційних умов.

Ключові слова: пасивна сонячна система, модернізація, стіна Тромба.

Introduction

The destruction of housing and public infrastructure in Ukraine has created an urgent need for affordable, rapid, and sustainable reconstruction technologies. Among various renewable and passive energy solutions, Trombe walls—solar-heated thermal-mass walls—offer a robust and locally manufacturable method for reducing heating loads. However, their efficiency strongly depends on daily and seasonal climatic variations. By introducing smart control through sensors and low-cost microcontrollers, the thermal behavior of such systems can be optimized in real time, making them suitable for modern modular dwellings, schools, or emergency shelters. This research builds upon previous experimental work on Trombe wall modeling at the UWB and extends it toward an adaptive control concept applicable to the Ukrainian climate zones.

Methodology

The study combines experimental modeling and numerical simulation. A physical prototype with dimensions 780 × 580 × 580 mm was constructed from extruded polystyrene insulation (100 mm thick) and a 35 mm cast-concrete heat-storage plate coated in matte black paint (Fig.1). Two wooden flaps, operated manually or by servo motors, regulate airflow between the air cavity and the interior space. Temperature data from ten DS18B20 digital sensors were collected and stored via a Wi-Fi-enabled microcontroller on a cloud database, allowing remote monitoring and algorithmic analysis. Numerical simulations were conducted in COMSOL Multiphysics using the Heat Transfer in Solids and Surface-to-Surface Radiation modules. The thermal field was modeled through the unsteady Fourier equation, complemented by radiative exchange equations based on the Stefan–Boltzmann law. Convection was considered during the “day mode” with open flaps and omitted during the “night mode” with closed flaps. A 3-D transient model captured the 5:00–23:00 h period, including realistic solar angles and meteorological inputs for both Pilsen and Vinnytsia latitudes.



Fig. 1. Real measurement of the Trombe wall

Smart Control Concept

To enable adaptive operation, the system was equipped with a lightweight control algorithm built in Arduino IDE and trained using recorded temperature and irradiance data. The algorithm determines optimal flap positions according to solar radiation intensity, temperature gradients between the wall and indoor air, and predicted heat demand. The decision logic uses a simplified reinforcement-learning framework that minimizes the difference between measured indoor temperature and desired comfort range while maximizing solar heat gain. The control strategy operates in three stages:

1. Data acquisition: continuous temperature, irradiance, and humidity measurement.
2. Prediction: short-term forecast (1–2 h) of wall surface temperature using a regression model.
3. Action: automatic flap control and fan activation (if available) to regulate airflow.

Simulation scenarios compared manual operation, static on/off control, and AI-assisted control. The smart control increased useful solar gains by 15–22 % and reduced night-time heat losses by up to 30 % compared with a conventional passive wall.

Results and Discussion

The experimental validation confirmed the feasibility of combining passive architecture with low-power digital intelligence. Temperature data showed a close match between measured and simulated profiles, with less than 5 % deviation after calibration of material emissivity and ambient radiation parameters. Integrating the control algorithm in simulation revealed a smoother temperature curve inside the room and significantly improved comfort stability during cloudy or foggy conditions—common in Ukrainian continental winters.

Parametric sweeps indicated that increasing the concrete wall thickness from 35 mm to 70 mm and optimizing flap opening angles yielded the highest thermal-storage efficiency. Economic analysis suggests that the additional cost of sensors and actuators (< 2 % of total wall cost) is offset by a 10–15 % reduction in annual heating demand for small modular buildings.

Application for Ukraine’s Reconstruction

The proposed system aligns with Ukraine’s national recovery priorities focused on energy independence, decarbonization, and local material use. Trombe walls can be built from locally available sand, cement, and recycled glass, requiring minimal imported components.

Conclusions

The research demonstrates that modernized, sensor-controlled Trombe walls represent a promising hybrid between passive and intelligent energy systems. Future work will involve developing a cloud-connected monitoring network for multiple prototypes across different Ukrainian climatic regions, enabling large-scale data-driven optimization and integration with smart-microgrid platforms.

Acknowledgement This result was supported by project 25-PKKV-UM-001.

Milan Belik — PhD, Department of Power Engineering, University of West Bohemia in Pilsen, Pilsen, Czech Republic, email: belik4@fel.zcu.cz

Olena Rubanenko — Doctor of Engineering Science, Professor of Department of Electrical system and stations, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, email: olenarubanenko@vntu.edu.ua

Мілан Белік — доктор філософії (PhD), кафедра електроенергетики, Західночеський університет у місті Пльзень, Пльзень, Чеська Республіка, e-mail: belik4@fel.zcu.cz

Олена Рубаненко — докторка технічних наук, професорка кафедри електричних станцій та систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: olenarubanenko@vntu.edu.ua

OPTIMIZATION OF PHOTOVOLTAIC SYSTEM MODERNIZATION FOR UNIVERSITY ENERGY SUPPLY EFFICIENCY

¹ University of West Bohemia in Pilsen, Pilsen, Czech Republic

² Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine

³ Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyev, Ukraine

Abstract

This study focuses on possible usage of aged and obsolete PV system construction for possible modernization into new hybrid system. The task is to use original construction to reduce purchase and labor costs during modernization of 20 kWp photovoltaic power plant installed on flat roof.

Keywords: photovoltaic system, modernization, mounting system.

Анотація

Дослідження присвячене аналізу можливостей повторного використання застарілих і зношених конструкцій фотоелектричних систем з метою їх модернізації до нової гібридної конфігурації. Основне завдання полягає у застосуванні наявної монтажної конструкції для зниження витрат на придбання обладнання та оплати праці під час оновлення фотоелектричної станції потужністю 20 кВт, встановленої на плоскому даху.

Ключові слова: фотоелектрична система, модернізація, монтажна система.

Introduction

Given the planned scope of the modernization, this is not a repair, but a fundamental change in the parameters and components of the entire power plant. For implementation, complete project documentation must be prepared in accordance with the currently applicable legislation. We would like to remind you that from January 1, 2025, each PV project must include a static assessment and an LPS project. It cannot be guaranteed that the existing supporting structure will meet the expected design and it is possible that the total project costs will increase by the costs of modifying or replacing this structure. Similarly, it can be assumed that it will be necessary to modify or expand the existing LPS, which will again be reflected in the total project costs. Independently of this project, I recommend evaluating the current overall condition of the LPS at the FEL facility. The use of roofs has changed and expanded over time and some parts (e.g. antennas or various data lines) are probably not protected by the existing LPS.

Assessment of the current situation

The planned project to expand the photovoltaic power plant assumes full or partial use of the existing supporting structure of the 20 kWp PV plant and possibly the adjacent roof area for the installation of new PV modules to cover self-consumption at the location in Pilsen. The layout of the existing PV plant is clear from Fig. 1.

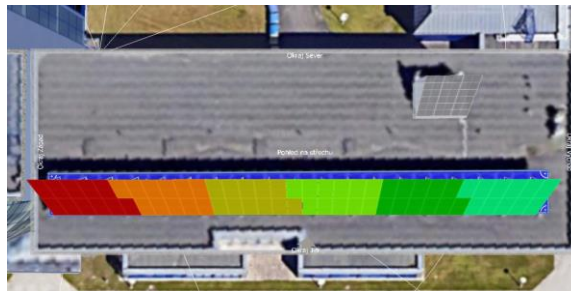


Fig. 1. Visualization of system consisting from CanadianSolar CS6WT

Existing System Assessment

The original array produced approximately 16,823 kWh per year, with a PR of 64.7 %. The front section of the structure, anchored by 28 roof feet and inclined at 45°, is oriented 8° SE from south. Degradation mechanisms such as corrosion and biological colonization were documented and evaluated. Despite aging, the supporting structure remains largely intact, suggesting it could serve as a base for modernization after mechanical verification.

Modernization Scenarios

Three main variants were developed:

1. **Variant 1 – Canadian Solar CS6W-580T:** Replacement of front-row modules yields 38.28 kWp installed capacity, producing 45,328 kWh annually with a specific yield of 1,180.6 kWh/kWp and PR = 92.6 %.
2. **Variant 2 – Jinko Solar Tiger Neo JKM550N (bifacial):** Installed capacity 36.6 kWp; annual yield 46,995 kWh (+9.6 % compared with Variant 1); specific yield 1,290.9 kWh/kWp and PR = 92.2 %. This configuration provides the best balance of power, weight, and efficiency, making it suitable for lightweight roof structures.
3. **Variant 3 – Aero Structure Extension:** New “aero” mounts on free roof area with 41.76 kWp installed capacity and 46,909 kWh annual yield. Despite the higher capacity, a 10° tilt limits PR to 85.3 %. Increasing inclination to 15° would improve yield but slightly increase structural load.

All simulations confirm that the generated energy would be fully utilized for the building’s self-consumption (typical weekend minimum $\approx$ 60 kW), avoiding network overflows. The projected unit cost is 11,200–12,200 CZK/kWp (retail basis), while complete system costs on the Czech market range between 20,000–25,000 CZK/kWp, depending on the extent of modifications, LPS updates, and project supervision.

Discussion

The modernization of obsolete PV constructions offers both economic and educational value. For research institutions, partial preservation of the original installation maintains a unique long-term dataset for studying PV degradation, biological corrosion, and evolving biotopes. Additionally, maintaining the “oldest operational PV plant” status provides outreach and marketing benefits for public events. From a didactic perspective, hybrid inverters and bifacial modules create new opportunities for laboratory training and student research.

Although modernization costs depend heavily on structural inspections, the simulations demonstrate that reusing the existing framework can halve total investment compared with complete reconstruction. Hybrid readiness enables future integration of a battery storage system, enhancing flexibility and self-consumption. The study thus contributes to the broader discussion on sustainable refurbishment of early-generation PV plants, aligning with circular-economy principles and decarbonization objectives.

Conclusions

The analysis confirms that modernization of the 20 kWp FEL PV plant is technically and economically feasible. The best-performing configuration employs bifacial Jinko Solar modules on the existing structure, yielding nearly 47 MWh per year with minimal additional roof modifications. Reusing the obsolete mounting system reduces costs and environmental footprint while preserving a valuable research facility. Future work will involve detailed static assessment, LPS re-design, and evaluation of hybrid energy-storage integration to form a fully functional experimental hybrid micro-PV system.

Milan Belik — PhD, Department of Power Engineering, University of West Bohemia in Pilsen, Pilsen, Czech Republic, email: belik4@fel.zcu.cz

Olena Rubanenko — Doctor of Engineering Science, Professor of Department of Electrical system and stations, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, email: olenarubanenko@vntu.edu.ua

Мілан Белік — доктор філософії (PhD), кафедра електроенергетики, Західночеський університет у місті Пльзень, Пльзень, Чеська Республіка, e-mail: belik4@fel.zcu.cz

Олена Рубаненко — докторка технічних наук, професорка кафедри електричних станцій та систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: olenarubanenko@vntu.edu.ua

АНАЛІЗ ВПЛИВУ КОНФІГУРАЦІЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ НА ВТРАТИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ НА КОРОНУ

¹ НЕК Укренерго;² Національний університет біоресурсів і природокористування України

Анотація

Подано вдосконалену математичну модель оцінки кліматичних втрат електроенергії на корону в повітряних лініях. Модель враховує еквівалентну висоту проводу за ПУЕ та розрахунок у трьох фазах методом симетричних складових. Уточнено визначення початкової напруженості поля при поганій погоді. Показано значний вплив форми опор і наявності грозозахисного троса на втрати, що підвищує точність нормативних табличних даних.

Ключові слова: кліматичні втрати електричної енергії, втрати на корону, повітряні лінії електропередачі, конфігурація опор, грозозахисний трос.

Abstract

An improved mathematical model for assessing climate-related corona losses in overhead power lines is presented. The model accounts for the equivalent conductor height (per PUE) and enables three-phase calculations using the symmetrical components method. The initial electric field strength under bad weather is refined. The study shows a significant impact of tower geometry and the presence of a ground wire on losses, improving the accuracy of standard reference data.

Keywords: climatic losses of electric energy, losses on the crown, overhead power lines, configuration of supports, lightning protection cable.

Вступ

Проведено модифікацію математичної моделі оцінки кліматичних втрат електричної енергії на корону [1,4-6] шляхом урахування еквівалентної висоти проводу над землею h за параметрами, наведеними в Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). Зазначено, що при розрахунку початкової величини напруженості електричного поля на поверхні проводів ПЛ для поганої погоди ($E_{0пл}$), за якої корона спостерігається по всій довжині проводу (загальна корона), величину $E_{0пл}$ визначають за формулою (15) при $\delta = 1$. Уведено в математичну модель параметри для врахування процесів в трьох фазах.

Мета дослідження. Метою цієї роботи є модифікація та верифікація математичної моделі для оцінки втрат електричної енергії на корону з урахуванням впливу конструктивних характеристик типових опор 220 кВ (геометрія опори, положення і заземлення ГЗТ, підвісні елементи) на величину таких втрат.

Задача дослідження полягає у модифікації математичної моделі розрахунку кліматичних втрат електричної енергії на корону та оцінки впливу параметрів опори (висота, відстані між проводами, конфігурація опори, спосіб заземлення ГЗТ) на інтегральні втрати на корону для типових конфігурацій ліній 220 кВ.

Результати дослідження

Вказано, що похибка при використанні емпіричних функцій значно вище регламентованої (не більше 1% [2]), що обмежує їх використання та приводить до спотворень результатів. Обґрунтовано доцільність детальнішого розрахунку ємностей фаз із урахуванням конфігурації опор та наявності грозозахисного троса (ГЗТ), при цьому показано, що вплив самої опори на значення ємності фаз є незначним і може не враховуватися. Математичним експериментом доведено, що наявність ГЗТ призводить до суттєвого підвищення втрат на корону: при одному ГЗТ - до 4,6%, при двох - до 9%.

Показано, що різна форма опор зумовлює зміну середньорічних питомих втрат на корону: від -8,75% до майже 30% без ГЗТ та від -6,2% до майже 33,5% із ГЗТ.

Висновки

Отримані результати свідчать про доцільність урахування форми опор при формуванні табличних величин питомих втрат потужності та середньорічних питомих втрат на корону, наведених у нормативних документах, наприклад [3], з огляду на значний розкид отриманих значень.

Тези підготовлено в межах виконання бюджетної фундаментальної програми " Розроблення моделей та методів аналізу аномальних режимів електричних мереж в умовах часткового

пошкодження електрообладнання для відновлення їх безпечного функціонування і модернізації («Безпека-5»)» (КПКВК 6541030).

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- 1 Техніка високих напруг : [Навчальний посібник] / О.В. Гай, Кулик Б.І. – К. :Видавництво НУБІП України, 2021. – 710 с.
- 2 РД 34.20.172-74 Руководящие указания по учету потерь на корону и помех от короны при выборе проводов воздушных линий электропередачи переменного тока 330-750 кВ и постоянного тока 800-1500 кВ.
- 3 СОУ-Н ЕЕ 40.1 – 37471933-82 «Методичні рекомендації визначення технологічних витрат електричної енергії в трансформаторах і лініях електропередавання».
- 4 Буславец О.А., Коваль Я.М. К рас чету потер электроэнергии на корону в сетях НЕК Укрэнерго. *Электрические сети и системы*. 2013. № 2. С. 56-68.
- 5 Shevchenko S., Olubakinde E., Danylchenko D., Nazarenko I., Savchenko N., Shylkova L. Devising a method for reducing active power corona losses based on changing the structural parameters of a power transmission line. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. Vol. 1, no. 8(115). P. 18–25. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.253384>.
- 6 Олубакінде, Е. «Дослідження впливу ємності розщепленої фази на втрати потужності пов'язані з коронним розрядом». Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність, вип. 1 (4), Липень 2022, с. 56-61, doi:10.20998/2224-0349.2022.01.08.

Науковий керівник: **Гай Олександр Валентинович**— канд. техн. наук, доцент, НЕК «Укренерго», провідний експерт науково-дослідного супроводу, Київ, e-mail: gaalxold@gmail.com; ORCID ID: * <https://orcid.org/0000-0001-5460-7260>

Гай Ганна Анатоліївна — канд. пед. наук, Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ, e-mail: gtatana704@gmail.com.

Supervisor: **Gai Oleksandr V.** — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, NPC “Ukrenergo”, Leading Expert of Scientific Research Support, Kyiv, e-mail: gaalxold@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5460-7260>

Gai Hanna A. — Cand. Sc. (Ped.), National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, e-mail: gtatana704@gmail.com

Електрозабезпеченням споживачів агрегованих мікромереж: ситуативний аспект

¹Інститут електродинаміки Національної академії наук України;

²Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського

Повоєнне відновлення та розвиток об'єднаної енергетичної системи (ОЕС) України, значна частина об'єктів якої зазнала непоправних руйнувань, має відбуватися у напрямі утворення поєднаних системотвірними лініями електропередавання локальних енергетичних систем, що мають бути енергетично самодостатніми (в ідеальному випадку) зі значною часткою в структурі генеруючих потужностей ОЕС України розосереджених джерел генерування, зокрема і відновлюваних джерел енергії. Така трансформація ОЕС України сприятиме її перетворенню в свого роду *секційовану енергетичну структуру*, що забезпечуватиме надійне енергоживлення усіх сфер людської діяльності. За таких змін *елементарними* енергетично частково самозабезпеченими комірками першого рівня зазначеної *структури* можна вважати мікромережі (*елементарні мікромережі* – це мікромережі побутових споживачів, установ, комерційних і промислових підприємств, громад та інше).

За нормальних режимів розподільних електричних мереж, від яких забезпечується електроживлення мікромереж (і в які може надходити електроенергія від мікромереж у разі її продажу), процес споживання електроенергії в кожній такій мікромережі має відбуватися внаслідок розв'язання оптимізаційної задачі, метою якої є забезпечення потреб споживача в електроенергії та мінімізація його (умовного власника мікромережі) сумарних економічних витрат на певному часовому інтервалі (зазвичай, доба). В зазначених сумарних економічних витратах враховується (як прибуток) і вартість відпущеної в електричну мережу (проданої) електроенергії.

Інша ситуація виникає, коли для споживача мікромережі електроживлення від основної електричної мережі вимушено припиняється, тобто виникає «острівний» режим мікромережі, за якого доводиться розраховувати лише на власні джерела енергії та наявні енергоресурси. І тут варто згадати про переваги, насамперед в аспекті підвищення надійності електропостачання, які з'явилися з утворенням енергосистем, а потім і енергооб'єднань. Чи зникнуть вони внаслідок зазначених вище змін, що стосуються ОЕС України, які окремі автори називають «переходом до децентралізованої енергетики»? Звісно, що ні, оскільки «децентралізація» (розосередження) стосується джерел енергії, а оперативно-диспетчерське керування ОЕС України зі своїми функціями залишається. Відповідні переваги з'являються і у разі агрегування *елементарних* мікромереж з утворенням, наприклад, агрегованих мікромереж певних селищ, населених пунктів, територіальних громад. Внаслідок такого агрегування *елементарні* мікромережі, що входять до складу агрегованої мікромережі, зберігають свою незалежність (самостійність) щодо використання власних технічних засобів та енергоресурсів за нормального режиму розподільної електричної мережі. У разі виникнення «острівного» режиму функціонування агрегованої мікромережі усі джерела енергії та енергоресурси, які мають *елементарні* мікромережі, надходять в розпорядження системи керування агрегованої мікромережі з метою забезпечення тривалого електроживлення об'єктів критичної інфраструктури, важливих в аспекті життєзабезпечення відповідної громади, а також забезпечення (у разі змоги) електроживлення інших споживачів, агрегованих в кластери за пріоритетністю.

Для перевірки ефективності «ситуативного» підходу в середовищі MATLAB / Simulink було створено модель агрегованої мікромережі у складі двох *елементарних* мікромереж, кожна з яких містила сонячні електростанції (сумарною потужністю 16 МВт), вітрові електростанції (6 МВт) та установку зберігання електроенергії (500 кВт / 1000 кВт·год). Модель реалізує дворівневу архітектуру системи керування. Другий рівень діє у разі виникнення «острівного» режиму. Усі споживачі агрегованої мікромережі об'єднані в кластери за пріоритетністю електрозабезпечення. Моделювання виконано для літнього та зимового пікових періодів у добовому горизонті.

Отримані результати підтвердили доцільність використання дворівневої архітектури системи керування електроживленням споживачів агрегованої мікромережі відповідно до кластерів.

О.В. Гай¹
І.В. Блінов¹
А.О. Ворущило²
Г.А. Гай³

ОПТИМІЗАЦІЯ КІЛЬКОСТІ РІЗНОРІДНИХ ЗАСОБІВ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ СПОЖИВАЧІВ В СИСТЕМАХ РОЗПОДІЛУ З УРАХУВАННЯМ ІНВЕСТИЦІЙНИХ ОБМЕЖЕНЬ НА ЇХ ВСТАНОВЛЕННЯ

¹ Інститут електродинаміки НАН України;

² Інститут загальної енергетики Національної академії наук України

³ Національний університет біоресурсів і природокористування України

Анотація

Представлено модель визначення оптимальної кількості засобів підвищення надійності в розподільних мережах з урахуванням інвестиційних обмежень і штрафів за невиконання планових показників. Розроблено імітаційну модель, що включає опис об'єкта, пошук оптимальної кількості роз'єднувачів з урахуванням початкових умов і оцінку спільного встановлення роз'єднувачів та показників пошкодження. Сформовано узагальнену цільову функцію для вибору оптимального рішення.

Ключові слова: засоби підвищення надійності, інвестиційні обмеження, показники надійності, початкові умови, показники місця пошкодження, роз'єднувачі.

Abstract

Presents a model for determining the optimal number of reliability enhancement devices in distribution networks, considering investment limits and penalties for unmet reliability targets. A simulation model is developed, including system representation, optimization of disconnectors based on initial conditions, and joint placement of disconnectors and fault indicators. A generalized objective function is formulated to obtain the optimal solution.

Keywords: reliability enhancement devices, investment constraints, reliability metrics, initial conditions, fault location indicators, disconnect switches.

Вступ

В Україні визначено кілька пріоритетних напрямів технічної політики в електроенергетиці, серед яких особливе місце займають підвищення надійності та ефективності розподільних мереж. Їх реалізація ґрунтується на впровадженні сучасних технологій керуваності [1–3] і раціональному виборі кількості та типів технічних засобів підвищення надійності. Перспективним напрямом розвитку є застосування різномірних пристроїв, що дозволяють скоротити час пошуку місця пошкодження та відновлення електропостачання з урахуванням топології мережі й особливостей електроспоживання [4].

Мета дослідження. Метою є визначення оптимальної кількості різномірних засобів підвищення надійності в розподільних електричних мережах з урахуванням ненульових початкових умов, інвестиційних обмежень і додаткових витрат, шляхом розроблення та використання комплексної математичної моделі.

Об'єкт дослідження є процеси функціонування розподільних електричних мереж 6-20кВ з урахуванням засобів підвищення надійності. Задача дослідження полягає у визначенні оптимальної кількості різномірних засобів підвищення надійності для об'єкту дослідження. Запропонована модель ґрунтується на усереднених показниках функціонування та реальних умовах експлуатації з врахуванням ненульових початкових умов щодо встановленого обладнання. Аналіз базується на інформації щодо вартості показників надійності, актуальних для оператора системи розподілу.

У рамках дослідження термін «різномірні засоби підвищення надійності» застосовується для двох типів засобів — роз'єднувачів та показників пошкодженої ділянки, однак модель є узагальненою і дозволяє подальше розширення на інші типи організаційних та технічних рішень; термін «ненульові початкові умови» - це значення змінних (стану, координат, швидкостей, напруг, струмів тощо) на початку розрахунку або моделювання, відмінні від нуля, які визначають фактичний початковий стан системи. В розрізі нашого дослідження термін "ненульові початкові умови" означає, що в об'єкті вже існують раніше встановлені засоби підвищення надійності - тобто об'єкт не перебуває в "нульовому" (вихідному) стані.

Результати дослідження

В роботі розроблено математичну модель визначення оптимальної кількості засобів підвищення надійності (роз'єднувачів та показників пошкоджених ділянок) для розподільчих електричних мереж 6–20 кВ з урахуванням вже наявних пристроїв (ненульових початкових умов) та інвестиційних обмежень. За результатами досліджень сформовано цільову функцію мінімізації додаткових витрат, пов'язаних з перевищенням нормативного рівня показника SAIDI, що дозволяє враховувати економічну ефективність запропонованих рішень. Для підтвердження роботоспроможності запропонованої моделі проведено числовий експеримент з використанням AMPL-коду та Bonmin-середовища на NEOS-сервері, що дало змогу визначити оптимальну кількість засобів залежно від вартості 1 хвилини перевищення SAIDI (COST_SAIDI від 1000 до 75000 грн). Отримані результати та залежності спрямовані на їх використання під час прийняття рішень щодо встановлення технічних засобів підвищення надійності електропостачання та формування інвестиційних програм операторів систем розподілу.

Висновки

Запропонована модель дозволяє враховувати комбінації різнорідних технічних засобів та є основою для врахування інших типів пристроїв, а також врахування конкретної топології електричної мережі та різних сценаріїв відновлення.

Тези підготовлено в межах виконання наукової роботи "Моделі та засоби підвищення надійності розподільних електричних мереж в умовах зростання генерації відновлювальних джерел енергії" (Монітор-5)» (КПКВК 6541030).

Автори висловлюють щире подяку рецензентам за змістовні зауваження та цінні рекомендації, що сприяли покращенню якості матеріалу. Особлива вдячність колективу відділу методів негладкої оптимізації № 120 Інституту кібернетики імені В. М. Глушкова НАН України, очолюваного членом-кореспондентом НАН України, доктором фізико-математичних наук, старшим науковим співробітником Стецюком П.І., за підтримку та наукові консультації в процесі виконання дослідження.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- 1 Спосіб оцінки ефективності встановлення індикаторів пошкоджень на повітряних лініях електропередачі / Бець О.Ю., Блінов І.В., Парус Є.В. // Праці ІЕД НАНУ. – 2015. – Вип. 42. – С. 32-37.
- 2 Analysis of the Effectiveness Fault Indicators use for Control Overhead Power Lines. Blinov I., Zaitsev, Y. Parus and V. Bereznychenko. 2022 IEEE 8th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), Kyiv, Ukraine, 2022, pp. 17-20. DOI: 10.1109/ESS57819.2022.9969272.
- 3 Parus, Ye. V., Blinov, I. V., Bets, O. Yu. (2016). Fault Indicators Location and Quantity Selection on Distribution Line as a Problem of Combinatorial Optimization. Technical Electrodynamics, 5, 58-60. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.05.058>.
- 4 Blinov, I. V., Parus, Ye. V., Rybina, O. B., Tankevych, S. Ye. (2018). Optimal architecture and equipment of the distribution line monitoring system. Proceedings of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 50, 16-22. <http://jnas.nbuv.gov.ua/article/UJRN-0000906819> [In Ukrainian].
- 5 Blinov, I., Miroshnyk, V., & Sychova, V.V. (2023). Short-term forecasting of electricity imbalances using artificial neural networks. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1254.
- 6 Volodymyr, K., Oleksandr, G., Oleksandr, S., Savchenko, V., & Svitlana, M. (2020). Optimization of Sectionalization Parameters of Distributive Electric Networks. In Handbook of Research on Smart Computing for Renewable Energy and Agro-Engineering (pp. 78-105). IGI Global. doi: 10.4018/978-1-7998-1216-6.ch004
- 7 Popov, V., Tkachenko, V., Kostiuk, V. O., Yarmoliuk, O., & Frolov, I. (2022, October). Optimal Distribution Networks Sectionalizing to Comply Reliability Indexes Regulations. In 2022 IEEE 8th International Conference on Energy Smart Systems (ESS) (pp. 95-100). IEEE. doi: 10.1109/ESS57819.2022.9969256.
- 8 Denysiuk, S., & Derevianko, D. (2017). A novel method of complex reliability assessment in microgrids with distributed generation. 2017 International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), 212-215.
- 9 Шполянський, О. 2025. ОПТИМАЛЬНЕ РОЗМІЩЕННЯ СЕКЦІОНАЛІЗАТОРІВ ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ. ТЕХНІЧНА ЕЛЕКТРОДИНАМІКА. 1 (Січ 2025), 089. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2025.01.089>.
- 10 Kozyskyi, V. V., & Gai, O. V. (2013). Methods and models for calculating the reliability of power supply systems: a monograph. K.: Gnosis, 563.
- 11 Bonami, P., Biegler, L.T., Conn, A.R., Cornuéjols, G., Grossmann, I.E., Laird, C.D., Lee, J., Lodi, A., Margot, F., Sawaya, N.W., & Wächter, A. (2008). An algorithmic framework for convex mixed integer nonlinear programs. Discret. Optim., 5, 186-204.
- 12 NEOS Solver. (n.d.). Retrieved from <https://neos-server.org>.

Науковий керівник: **Блінов Ігор Вікторович** – докт. техн. наук, Інститут електродинаміки НАН України, Київ, e-mail: blinovigor@gmail.com;

Гай Олександр Валентинович — канд. техн. наук, доцент, НЕК «Укренерго», провідний експерт науково-дослідного супроводу, Київ, e-mail: gaalxold@gmail.com; ORCID ID: * <https://orcid.org/0000-0001-5460-7260>

Гай Ганна Анатоліївна — канд. пед. наук, Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ, e-mail: gtatana704@gmail.com;

Ворушило Антон Олексійович — аспірант, Інститут загальної енергетики Національної академії наук України, Київ, e-mail: anton2320@gmail.com.

Supervisor: **Blinov Ihor V.** — Dr. Sc. (Eng.), Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, e-mail: blinovihor@gmail.com.

Gai Oleksandr V. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, National Power Company “Ukrenergo”, Leading Expert in Research Support, Kyiv, e-mail: gaalxold@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5460-7260>.

Gai Hanna A. — Cand. Sc. (Ped.), National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, e-mail: gtatana704@gmail.com.

Vorushylo Anton O. — PhD Student, Institute of General Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, e-mail: anton2320@gmail.com.

СЕГМЕНТАЦІЯ ПАРКУ ОБЛАДНАННЯ МЕТОДАМИ КЛАСТЕРНОГО АНАЛІЗУ

¹НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Анотація

Запропоновано метод сегментації парку силового обладнання і повітряних ліній енергосистеми, який забезпечує виявлення одиниць обладнання, які мають найбільший ризик відмови на основі використання алгоритмів кластеризації.

Ключові слова: ризик, комутаційне обладнання, сегментація, парк обладнання, кластер, кластерний аналіз, повітряні лінії.

Abstract

A method for segmenting power equipment and power system overhead lines is proposed, which identifies equipment units with the highest risk of failure based on the use of clustering algorithms

Keywords: risk, switching equipment, segmentation, equipment fleet, cluster, cluster analysis, overhead lines.

Вступ

Існує об'єктивна неможливість одночасного фінансування ремонтно-експлуатаційних витрат для всієї сукупності об'єктів енергосистеми. У зв'язку з цим виникає необхідність сегментації наявного парку електрообладнання і повітряних ліній енергокомпаній, яка може проводитись в декілька етапів.

Результати досліджень

Для визначення груп електрообладнання і повітряних ліній (ПЛ) з підвищеним ризиком експлуатації, використовуючи алгоритми кластеризації було розглянемо схему підсистеми енергосистеми (ЕЕС) енергокомпанії, яка містить такі типи обладнання: синхронні генератори, силові трансформатори, повітряні лінії високовольтні вимикачі. Було визначено ознаки за якими будуть оцінюватись об'єкти у вибірці. При цьому сформовано перелік ознак за якими необхідно виконати групування наявного парку електрообладнання для розподілу інвестиційних витрат на обслуговування і заміну обладнання. В якості таких ознак доцільно взяти наступні показники, використовувались для оптимального розподілу витрат на ТО і Р: імовірність відмови на інтервалі часу спостереження, ризик порушення нормального режиму при відмові об'єкта, залишкова вартість основних фондів, пропуск електроенергії за якими визначається інтегральний показник для виділення коштів А.

Між тим для прийняття оперативних рішень щодо планового і позапланового виведення з експлуатації електрообладнання і ПЛ було визначено перелік ознак за якими необхідно виконати групування як в межах певного типу обладнання так і всього наявного парку електрообладнання і ПЛ. До таких оперативно значущих ознак відносяться - в першу чергу імовірність відмови обладнання на інтервалі часу спостереження та ризик порушення нормального режиму підсистеми ЕЕС у разі відмови чи планового або позапланового виведення з експлуатації електрообладнання і ПЛ.

Для трьох вікових діапазонів (0-25; 25-50; 50-75) було виконано сегментацію парку електрообладнання і ПЛ кластеризацією методом к-середніх в частині потреби першочергового виділення коштів на ТО і Р та заміну обладнання за величиною показника А, а також прийняті оперативні рішення щодо планового і позапланового виведення з експлуатації електрообладнання і ПЛ за імовірністю відмови обладнання на інтервалі часу спостереження та рівнем ризику виникнення аварійної ситуації в підсистемі ЕЕС у разі відмови чи виведення з експлуатації електрообладнання і ПЛ.

Висновки

Реалізація запропонованого підходу забезпечує формування обґрунтованої послідовності ремонтів або заміни елементів парку обладнання, що дозволяє знизити ризик порушення нормального режиму роботи ЕЕС. Отримані результати мають практичну важливість для енергогенерувальних та енергозбутових компаній, оскільки дозволяють приймати превентивні рішення, які спрямовані на

підвищення стійкості ЕЕС та більш доцільного розподілу коштів енергокомпаній.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] Eltyshev, D. K. (2021b). Electric equipment operation scenarios based on the results of non-destructive condition control. Journal of Physics Conference Series, 1886(1), 012010. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1886/1/012010>.

[2] Ciapessoni, E., Cirio, D., Massucco, S., & Pitto, A. (2011). A Probabilistic Risk Assessment and Control methodology for HVAC electrical grids connected to multiterminal HVDC networks. IFAC Proceedings Volumes, 44(1), 1727–1732. <https://doi.org/10.3182/20110828-6-it-1002.02739>

[3] Duan, C., Chen, X., Shi, H., & Liu, H. (2019). A new model for failure mode and effects analysis based on K-Means clustering within hesitant linguistic environment. IEEE Transactions on Engineering Management, 69(5), 1837–1847. <https://doi.org/10.1109/tem.2019.2937579>.

[4] Chiang, H., Xu, T., Lv, X., & Dong, N. (2022). Hierarchical Trust-Tech-Enhanced K-Means methods and their applications to power grids. IEEE Open Access Journal of Power and Energy, 9, 560–572. <https://doi.org/10.1109/oajpe.2022.3230385>.

Бардик Євген Іванович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри відновлювальних джерел енергії, КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, e-mail: bardik1953@gmail.com

Бондаренко Олександр Леонідович – доктор філософії, асистент кафедри відновлювальних джерел енергії, КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, e-mail: bonduro@gmail.com

Заклюка Ігор В'ячеславович – аспірант кафедри відновлювальних джерел енергії, КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, e-mail: ihorzakliuka1@gmail.com

ПРЕДИКТИВНИЙ АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ

¹НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Анотація

Запропоновано методологію предиктивного аналізу технічного стану електрообладнання, яка поєднує кількісні дані, результати моніторингу та експертні оцінки для прогнозування відмов і оцінки ризиків при експлуатації. Розроблена система на основі нечіткої логіки та адаптивних алгоритмів дозволяє ідентифікувати дефекти, визначати ймовірність відмов та формувати рекомендації щодо оптимальної стратегії експлуатації. Застосування підходу забезпечує підвищення надійності, зниження аварійності та відповідність цілям сталого розвитку енергетичної інфраструктури.

Ключові слова: нечітка логіка, електрообладнання, оцінка ризику, дефект, відмова.

Abstract

A methodology of predictive analysis of the technical condition of electrical equipment is proposed, which integrates quantitative data, monitoring results, and expert evaluations for failure forecasting and operational risk assessment. The developed system, based on fuzzy logic and adaptive algorithms, enables defect identification, estimation of failure probability, and the formulation of recommendations for an optimal operation strategy. The application of this approach ensures improved reliability, reduced failure rates, and compliance with the goals of sustainable development of the energy infrastructure.

Keywords: fuzzy logic, electrical equipment, risk assessment, defect, failure.

Вступ

Сучасні електроенергетичні системи (ЕЕС) функціонують в умовах інтенсивного зношення електрообладнання (ЕО), вичерпання ресурсу та активної інтеграції ВДЕ. Це призводить до зниження надійності, збільшення кількості аварійних ситуацій та ускладнює прийняття рішень щодо подальшої експлуатації ЕО. Планове або аварійне виведення ЕО може стати причиною каскадних аварій і суттєвих економічних збитків. Це вимагає впровадження методології предиктивного аналізу технічного стану, яка дозволяє поєднати кількісні дані та експертні оцінки для своєчасного прогнозування відмов та визначення ризиків виведення ЕО з експлуатації.

Результати досліджень

Встановлено, що значна частка ЕО реальних ЕЕС характеризується погіршеним технічним станом, а економічні обмеження щодо його заміни призводять до зростання ризику відмов і ускладнюють підтримання високих рівнів надійності. У цих умовах ефективним рішенням є створення системи предиктивного аналізу технічного стану, яка поєднує методи моніторингу, статистичного моделювання та експертного оцінювання.

Обґрунтовано необхідність комплексного моделювання технічного стану та режимів ЕЕС для визначення ризику порушення нормального режиму при відмовах ЕО. Запропоновано методологію, яка ґрунтується на переході від періодичного діагностування до безперервного моніторингу параметрів технічного стану, використанні ретроспективної статистики відмов, а також адаптивних алгоритмів, здатних до самонавчання. Використання інтелектуальних методів обробки даних, нечіткої логіки та багатокритеріального аналізу, забезпечує можливість врахування невизначеності, неповноти та нечіткості вхідної інформації. Розроблена система дозволяє визначати ймовірність відмови ЕО з урахуванням технічного стану та ідентифікувати дефекти, класифікувати ступінь їх критичності, а також формувати рекомендації щодо черговості виведення з експлуатації. Комплексне моделювання режимів підсистем ЕЕС дало змогу кількісно оцінити ризики порушення нормального режиму та проведено порівняння результатів з характеристиками реальних аварій підтвердило адекватність моделі та її придатність для експрес-аналізу надійності та прийняття управлінських рішень.

Висновки

Інтеграція методології предиктивного аналізу технічного стану ЕО створює основу для підвищення надійності та зменшення аварійності ЕЕС. Запропонований підхід дозволяє враховувати невизначеність та багатофакторність ризиків, формувати превентивні рішення щодо експлуатації ЕО, оптимізувати стратегію його експлуатації та знижувати ймовірність каскадних відмов. Це забезпечує перехід до нового рівня управління технічним станом, що відповідає завданням сталого розвитку енергетичної інфраструктури.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Бардик Є. І., Бондаренко О. Л., Болотний М. П. Аналіз режимної надійності при плануванні сталого розвитку енергосистеми. Відроджена енергетика. 2024. № 4(79). С. 46–58. URL: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.4\(79\).46-58](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.4(79).46-58).
- [2] Bardyk E. I., Bolotnyi N. An Analysis of Uncertainty for Failure Risk Assessment of Power Transformer. 2022 IEEE 8th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), Kyiv, Ukraine, 12–14 October 2022. 2022. URL: <https://doi.org/10.1109/ess57819.2022.9969341>.
- [3] Bardyk E. I., Bolotnyi N. P. Development of fuzzy classifier for technical condition ranking of power transformer. Electrical Engineering & Electromechanics. 2023. No. 5. P. 3–13. URL: <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2023.5.01>.
- [4] Bardyk E., Bolotnyi N. Parametric identification of fuzzy model for power transformer based on real operation data. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 6, no. 8 (90). P. 4–10. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.118632>.

Бардик Євген Іванович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри відновлювальних джерел енергії, КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, e-mail: bardik1953@gmail.com;

Болотний Микола Петрович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри відновлювальних джерел енергії, м. Київ, e-mail: nickolai2007@ukr.net;

Бондаренко Олександр Леонідович – доктор філософії, асистент кафедри відновлювальних джерел енергії, КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, e-mail: bonduro@gmail.com.

Bardyk Eugen Ivanovych – Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of Department of Renewable Energy Sources, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, e-mail: bardik1953@gmail.com;

Bolotnyi Mykola Petrovych – Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of Department of Renewable Energy Sources, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, e-mail: nickolai2007@ukr.net;

Bondarenko Oleksandr Leonidovich – PhD, Assistant of Department of Renewable Energy Sources, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, e-mail: bonduro@gmail.com.

МОДЕЛЮВАННЯ РОЗПОДІЛЬНОЇ МЕРЕЖІ НИЗЬКОЇ НАПРУГИ З РОЗОСЕРЕДЖЕНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ

Луцький національний технічний університет

Впровадження розподілених джерел енергії (РДЕ) у мережі низької напруги є значним кроком у розвитку сучасних енергетичних систем. Традиційні централізовані мережі поступово замінюються системами децентралізованого виробництва енергії, такими як сонячні фотоелектричні системи, вітряні турбіни, накопичувачі енергії та інші локальні джерела. Внаслідок цього замість односторонньої передачі електроенергії виникає двосторонній обмін електроенергією в мережі. Ця зміна впливає на регулювання напруги, роботу релейного захисту та стійкість енергосистеми, що потребує ретельного аналізу та перегляду конфігурації мережі.

Сучасні енергетичні системи характеризуються динамічними режимами роботи та різними вхідними параметрами, що зумовлює необхідність застосування складних методів моделювання для забезпечення їх надійності та ефективності. Моделювання і симуляція розподілених енергетичних мереж із інтеграцією розподілених джерел енергії розглядаються у працях [1, 2]. У роботі [3] досліджуються різні режимні варіанти роботи системи розосередженого виробництва енергії за змінних вхідних параметрів за допомогою математичного моделювання.

На рис. 1 подано запропоновану модель мережі низької напруги, реалізовану у середовищі MATLAB/Simulink, для ділянки мережі з акумуляторною батареєю. Модель дозволяє оцінювати рівень напруги у вузлах мережі залежно від зміни навантаження та рівня інсоляції СЕС.

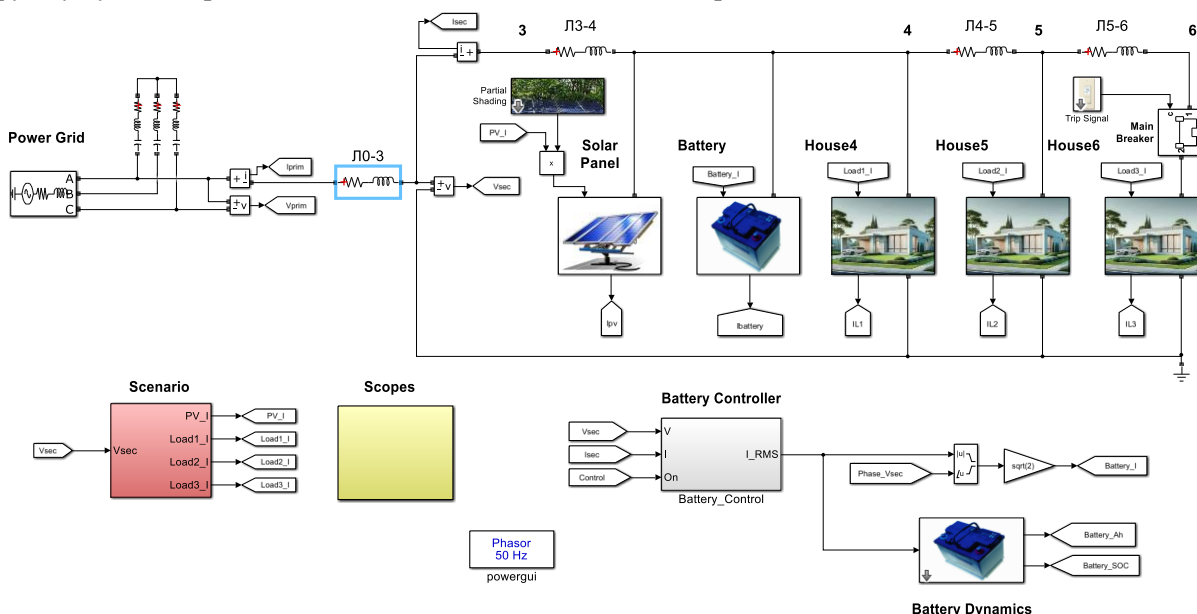


Рис. 1. Модель ділянки мережі

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Juan Caballero-Peña, Cristian Cadena-Zarate, Alejandro Parrado-Duque, German Osma-Pinto, «Distributed energy resources on distribution networks: A systematic review of modelling, simulation, metrics, and impacts», *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 138, June, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107900>.
2. D. Folarin, «Modeling And Simulation of Loads Into Existing Distribution Network System Using MATLAB/Simulink», *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering*, vol. 13, issue 2, ver. I, pp. 57-65, Mar. – Apr. 2018. doi:10.9790/1676-1302015765.
3. X.Y. Sun, X.H. Zhong, C.Z. Wang, T. Zhou, «Simulation research on distributed energy system based on coupling of PV/T unit and wind-to-heat unit», *Solar Energy*, vol. 230, pp. 843-858, December, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.11.011>.

Гадай Андрій Валентинович – к.т.н., доцент кафедри електричної інженерії факультету архітектури, будівництва та дизайну Луцького національного технічного університету.

Andriy Valentynovich Gaday – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering, Faculty of Architecture, Construction and Design, Lutsk National Technical University.

ОСОБЛИВОСТІ ПОБУДОВИ КОМІРКОВИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ

¹ Інститут електродинаміки НАН України;

² Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського

Анотація

Розглянуто особливості побудови коміркових електроенергетичних систем для підвищення надійності та стабільності електропостачання споживачів, в тому числі об'єктів критичної інфраструктури

Ключові слова: мікромережа, комірка, транзактивна енергія, розподілена генерація

Abstract

The features of building cellular power systems to increase the reliability and stability of power supply to consumers, including critical infrastructure facilities, are considered.

Keywords: microgrid, cell, transactive energy, distributed generation

Вступ

Повоєнний розвиток електроенергетики України передбачає не тільки визначення нових співвідношень між централізованою та децентралізованою генерацією, оптимальних обсягів генерації конкретними типами генераторів електроенергії (як відновлюваними, так і невідновлюваними), але й модернізацію електромережевого комплексу на основі цифрової трансформації.

Для нейтралізації дій нашого агресивного північного сусіда – росії – цифрова трансформація електромережевого комплексу нашої країни на регіональному (локальному) рівні можлива на основі побудови коміркових електроенергетичних систем.

Коміркова структура електроенергетичних систем стосується мікромереж, розташованих в ієрархічній мережі, де кілька менших мікромереж («комірок») утворюють більші, складніші системи мікромереж, що забезпечує підвищену надійність, масштабованість та локалізоване управління енергією.

Мета роботи виділення особливостей побудови коміркових електроенергетичних систем на основі принципів Інтернету енергії.

Результати дослідження

Проведений аналіз показав, що впровадження мікромереж, побудованих на основі принципів Інтернету енергії, є найбільш доцільним для формування розподіленої енергетики України, використання принципів побудови електроенергетичних систем у вигляді енергетичних комірок є підвищення надійності та якості електропостачання енергооб'єктів критичної інфраструктури за рахунок визначення і використання оптимальних умов реалізації найбільш важливих електротехнологічних процесів і законів керування ними [1, 2].

Інтернет енергії є комплексна структура забезпечує цифрову інфраструктуру для коміркових систем, забезпечуючи обмін даними в режимі реального часу, автономне прийняття рішень та розширені функції, такі як транзактивна енергія та участь на енергетичному ринку. Транзактивна енергія для енергетичних комірок забезпечує збір та зберігання записів про параметри енергетичних транзакцій; верифікацію виконання зобов'язань щодо енергетичних транзакцій на основі даних; організація операцій на енергетичному ринку.

Проведено розподіл комірок на 6 типів енергетичних комірок які взаємодіють одна з одною та надають економічні, соціальні та технічні впливи на всіх учасників мережі. Кожна «комірка» містить фундаментальні компоненти, які дозволяють їй працювати як самодостатній об'єкт: розподілені енергетичні ресурси (PER); навантаження, у тому числі гнучкі навантаження; системи контролю та керування (системи моніторингу, оптимізації та регулювання продуктивності комірки в режимі реального часу; система керування енергією, яка керує роботою PER та навантажень для забезпечення балансу потужності та ефективного керування).

Коміркова структура забезпечує розширене керування, яке дозволяє керувати потоком потужності, напругою та частотою, адаптуючись до різних режимів роботи:

- децентралізована робота (кожна енергетична комірка може функціонувати незалежно, спираючись на власне локальне виробництво та зберігання енергії для задоволення своїх енергетичних потреб, забезпечуючи стійкість навіть у разі виходу з ладу основної мережі);
- балансування енергію в режимі реального часу, оптимізуючи використання місцевих ресурсів для задоволення попиту з найнижчою можливою вартістю;
- інтеграція відновлюваних джерел енергії та ефективно керувати розподіленими ресурсами, сприяючи досягненню цілей декарбонізації.

Висновки

Розглянуто особливості побудови електроенергетичних систем (мікромереж), при представленні об'єктів енергосистеми у вигляді енергетичних комірок та використанні Інтернету енергії. Таке представлення електроенергетичної системи дозволить: підвищити стабільність та надійність української енергосистеми, модернізувати енергетичну інфраструктуру, збільшити частку відновлюваної енергії, забезпечити фінансові вигоди для всіх учасників.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Bielokha H. S. ; Denysiuk S. P. ; Derevianko D. H. . " Internet of Energy Based Cellular Structures for Distributed Microgrids" Publ. Nauka i Tekhnika. Odesa: Ukraine. Herald of Advanced Information Technology 8 (2), 233–244. <https://doi.org/10.15276/hait.08.2025.15>.
2. Кутуленко, О.; Denysiuk, S.; Bielokha, H.; Dyczko, A.; Stecula, B.; Pazynich, Y. Smart Monitoring and Management of Local Electricity Systems with Renewable Energy Sources. Energies 2025, 18, 4434. <https://doi.org/10.3390/en18164434>

Денисюк Сергій Петрович — д.т.н. проф. завідувач відділу автоматизації електричних систем Інститут електродинаміки НАН України, Київ, e-mail: spdens@ukr.net

Бєлоха Галина Сергіївна — к.т.н. доц., доцент кафедри електропостачання КПП імені Ігоря Сікорського, Київ, e-mail: pointage13@gmail.com

Denysiuk Serhii P. — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Electrical Systems Automation, Institute of Electrodynamics, NAS of Ukraine, Kyiv, e-mail: spdens@ukr.net

Bielokha Halyna S. — PhD, Associate Professor, Department of Power Supply, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, e-mail: pointage13@gmail.com

ПОБУДОВА ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНИХ ЛОКАЛЬНИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ ЗА КОНЦЕПЦІЄЮ ТРАНЗАКТИВНОЇ ЕНЕРГІЇ

Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського

Анотація

Розглянуто побудову децентралізованих локальних електроенергетичних систем за концепцією транзактивної енергії при оптимальній взаємодії розподілених енергетичних ресурсів

Ключові слова: мікромережа, транзактивна енергія, ринок електроенергії

Abstract

The construction of decentralized local electric power systems based on the concept of transactive energy with optimal interaction of distributed energy resources is considered.

Keywords: microgrid, transactive energy, electricity market

Вступ

На сьогодні актуальною науково-прикладною проблемою є підвищення енергетичної безпеки України через децентралізацію, енергоефективне, збалансоване та стабільне енергозабезпечення.

Децентралізовані мережі підвищують енергоефективність, стабільність, стійкість та сприяють сталому розвитку, але вимагають наявності регуляторної бази, залученість інвестицій та організації оптимальної взаємодії різних типів розподіленої генерації.

Транзактивна енергія є сучасним одним з методів організації децентралізованих мереж, яка допоможе вирішити поставлену науково-прикладну проблему.

Мета роботи. Побудова децентралізованих електроенергетичних систем при оптимальній взаємодії розподілених енергетичних ресурсів та споживачів за концепцією транзактивних систем.

Результати дослідження

Комплексний аналіз світових тенденцій розвитку децентралізованих електроенергетичних систем показав наявні підходи до побудови децентралізованих мереж, такі як локальні електроенергетичні системи, мікромережі, розумні мережі, транзактивні енергетичні системи.

Транзактивна енергетична система це локальна електроенергетична система (ЛЕС) на основі розподіленої генерації, система керування якої дозволяє динамічно балансувати попит і пропозицію за допомогою алгоритмів локального ринку, використовуючи вартість як ключовий операційний параметр [1, 2].

Використання концепції транзактивної енергії має істотні переваги над іншими типами керування ЛЕС з економічної точки зору при використанні ринкових механізмів для всіх учасників транзактивної системи що підвищує рівень залученості всіх учасників та самоорганізацію в складних системах взаємодії.

Транзактивна система є складною системою, та може бути представлена у вигляді архітектури (рис.1).

Система керування використовуються для досягнення певних цілей оптимізації. Проблема оптимізації визначається скалярною або векторною цільовою функцією за економічними, екологічними критеріями та критеріями надійності. В якості методу оптимізації режимів роботи транзактивної системи використовується комбінований метод оптимізації заснований на методах нелінійного програмування та на основі правил з певними обмеженнями, де зменшення вартості електричної енергії є цільовою функцією.

Для функціонування ЛЕС як транзактивних систем обов'язковим є наявність локального енергетичного ринку. Саме наявність внутрішнього (локального) ринку сприяє взаємодії всіх учасників, які можуть виступати як покупці так і продавці електроенергії. Агрегатор є важливою ланкою в диспетчеризації, він здійснює керування потужністю розподілених об'єктів, споживання, виробництва, зберігання енергії.

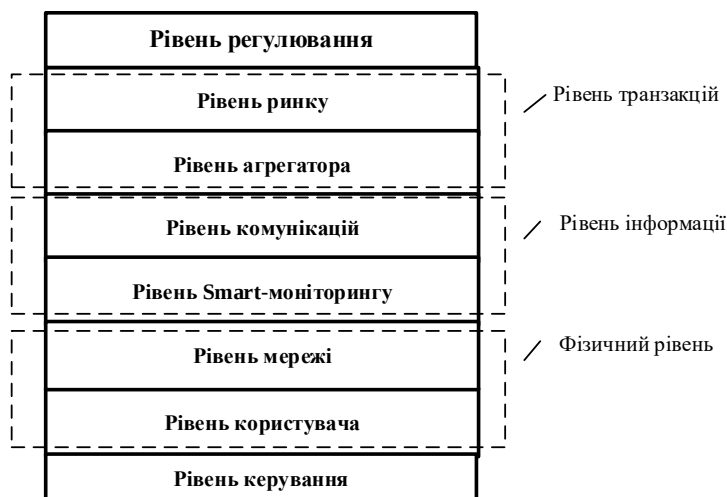


Рис.1 Архітектура транзактивної системи

Важливим є залучення споживачів до керування навантаженням: це застосування різних видів диференційованих за часом тарифів на електроенергію або за допомогою поведінкових стимулів тобто за допомогою програм реагування на попит.

На основі розглянутих особливостей функціонування окремих розподілених енергетичних ресурсів та їх взаємодій розроблено узагальнену методологію функціонування транзактивної системи з урахуванням використання програм реагування на попит та систем моніторингу. Поєднання програм реагування на попит з динамічним ціноутворенням, максимізує можливості для перерозподілу навантаження, зниження пікового попиту та гнучкості мережі, та спонукає споживачів до більш проактивної участі в програмах реагування на попит.

Висновки

Розглянуті особливості побудови та функціонування локальних електроенергетичних систем за концепцією транзактивної енергії при оптимальній взаємодії споживачів та генеруючих установок, розроблено методологію та побудовано математичні моделі, алгоритми, які описують та забезпечують взаємодію елементів системи, з урахування особливостей їх функціонування та цільових функцій, як на енергетичному рівні так і на транзактивних (локальних) ринках електричної енергії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Bielokha, H., Taraba, M. (2024). Optimal Transactive Energy System for Hybrid Renewable Energy Systems. In: Kyrylenko, O., Denysiuk, S., Strzelecki, R., Blinov, I., Zaitsev, I., Zaporozhets, A. (eds) Power Systems Research and Operation. Studies in Systems, Decision and Control, vol 512. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-44772-3_11
2. Белоха Г.С., Тараба М. Транзактивні локальні електроенергетичні системи: особливості функціонування та перспективи розвитку. Енергетика: економіка, технології, екологія. № 4 (2023), С.29-37. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.4.2023.290888>

Белоха Галина Сергіївна — к.т.н. доц., доцент кафедри електропостачання КПІ імені Ігоря Сікорського, Київ, e-mail: pointage13@gmail.com

Bielokha Halyna S. — PhD, Associate Professor, Department of Power Supply, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, e-mail: pointage13@gmail.com

ОЦІНЮВАННЯ ВТРАТ АКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ВІД КОРОННОГО РОЗРЯДУ В ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЯХ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ ТА ЇХ ВПЛИВ НА РЕЗОНАНСНІ ПЕРЕНАПРУГИ

¹ Національна академія наук України Інститут електродинаміки, Київ, Україна

Анотція

Для підвищення ефективності оперативного управління електроенергетичною системою (під час оцінювання поточного режиму та його оптимізації за напругою й реактивною потужністю) необхідно враховувати оперативно визначені втрати активної потужності на корону та використовувати реальні залежності втрат активної потужності на корону від напруги.

Ключові слова: коронний розряд; втрати активної потужності; повітряна лінія електропередавання; резонансн.

Abstract

To improve the efficiency of operational management of the electric power system (during the assessment of the current operating mode and its optimization in terms of voltage and reactive power), it is necessary to take into account the operationally determined active power losses caused by corona discharge and to use the actual dependencies of corona power losses on voltage

Keywords: corona discharge; active power losses; overhead transmission line; resonance overvoltages.

Математично модель описується як паралельне з'єднання лінійної ємності C_0 , що характеризує геометричну ємність провідників, і нелінійної ємності корони $C_{cor}(V)$, яка активується при $|V| > V_{кр}$. Такий підхід дозволяє розглядати корону не лише як джерело активних втрат, а як елемент, що впливає на динаміку електромагнітного поля у міжфазному та фазо-земельному проміжках.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Hunko, I., Kuchanskyi, V., Nesterko, A., Rubanenko, O.: Modes of electrical systems and grids with renewable energy sources—LAMBERT Academic Publishing, p. 184. (2019). ISBN 978–613–9–88956–3
- [2] V. Kuchanskyi and I. O. Zaitsev, "Corona Discharge Power Losses Measurement Systems in Extra High Voltage Transmissions Lines", 2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), pp. 48–53, 2020.
- [3] Blinov, I., Zaitsev, I.O., Kuchanskyi, V.V. (2020). Problems, Methods and Means of Monitoring Power Losses in Overhead Transmission Lines. In: Babak, V., Isaienko, V., Zaporozhets, A. (eds) Systems, Decision and Control in Energy I. Studies in Systems, Decision and Control, vol 298. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-48583-2_8
- [4] Zaitsev, I.O. & Kuchanskyi, V.V. (2021). Corona discharge problem in extra high voltage transmission line. In: Systems, Decision and Control in Energy II, Studies in Systems, Decision and Control (edited by A. Zaporozhets & V. Artemchuk). Pp. 3–30. Cham: Springer International Publishing.
- [5] Зайцев, Є., Кучанський, В., & Гунько, І. (2021). Підвищення експлуатаційної надійності та ефективності роботи електричних мереж та електроустановок: монографія. Publishing House «European Scientific Platform», 156. <https://doi.org/10.36074/penereme-monograph.2021>.
- [6] Кучанський В.В., Кузнецов В.Г., Тугай Ю.І. Вплив коронного розряду на кратність внутрішніх перенапруг у магістральних електричних мережах. Технічна електродинаміка. 2017. №6. С. 55 – 60.

Кучанський Владислав Володимирович — канд. техн. наук, старший дослідник, завідувач відділу оптимізації систем електропостачання, e-mail: kuchanskiyvladislav@gmail.com ;

Зайцев Євген Олександрович — д.т.н., с.н.с, завідувач відділу теоретичної електротехніки та діагностики електротехнічного обладнання;

Kuchansky Vladyslav V. — Cand. Sc. (Eng.), Senior Researcher, Head of the Department of Power-Supply Systems Optimization; e-mail: kuchanskiyvladislav@gmail.com;

Zaitsev Ievgen Oleksandrovich— Doctor of technical science, docent Head of the Department of theoretical electrical engineering and diagnostics of electrical equipment

В. Г. Кузнецов
В.В. Кучанський
Ю.І. Тугай
І.Ю. Тугай

ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВУ ЗАЛИШКОВОГО НАМАГНІЧУВАННЯ АВТОТРАНСФОРМАТОРА НА УМОВИ РОЗВИТКУ РЕЗОНАНСНИХ ПЕРЕНАПРУГ

¹ Національна академія наук України Інститут електродинаміки, Київ, Україна

Анотція

Трансформатори та автотрансформатори є основними електротехнічним обладнанням в енергосистемі, що працює в складних умовах. Струм намагнічування може спричиняти виникнення гармонік, ферорезонансні явища, просідання напруги в мережі, хибне спрацювання диференційного захисту трансформатора та пошкодження в енергосистемі. На сьогодні деякі дослідники вказують, що вплив струмів намагнічування може бути навіть серйознішим, ніж у режимі короткого замикання.

Ключові слова: автопараметричний резонанс, елегазовий вимикач, резонансні перенапруги, залишкове намагнічування, момент комутації, керований пристрій комутації.

Abstract

Transformers and autotransformers are the main electrical equipment in the power system, operating in difficult conditions. Magnetizing current can cause harmonics, ferroresonance phenomena, voltage sags in the network, false operation of the transformer differential protection and damage to the power system. Today, some researchers indicate that the impact of magnetizing currents can be even more serious than in the short-circuit mode.

Keywords: autparametric resonance, SF6 circuit breaker, resonant overvoltages, residual magnetization, switching moment, controlled switching device.

Пристрій призначений для забезпечення оптимального за фазою вмикання автотрансформаторів, силових трансформаторів та реакторів у мережах напругою 750 кВ. Його метою є зменшення пускових струмів намагнічування та запобігання резонансним перенапругам за рахунок урахування реального значення залишкового магнітного потоку Φ_{res} у момент комутації.

Блок оцінювання залишкового потоку (БКН) – обчислює миттєве значення та напрям залишкового магнітного потоку у кожному стрижні магнітопроводу після вимкнення за рівнянням:

$$\Phi_{res}(t) = \int_{t_0}^{t_1} (U_f - RI_f) dt \quad (1)$$

де U_f – миттєве значення напруги фази, I_f – струм, R – опір обмотки. Для забезпечення точності використовується цифровий інтегратор з компенсацією дрейфу нуля.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Kuchanskyy, V.: Criteria of resonance overvoltages occurrence in abnormal conditions of extra high voltage transmission lines. Visnyk naukovykh prats Vinnytskoho Natsionalnoho Tekhnichnoho Universytetu, no. 4, pp. 51–54. (2016).
- [2] Hunko, I., Kuchanskyi, V., Nesterko, A., Rubanenko, O.: Modes of electrical systems and grids with renewable energy sources—LAMBERT Academic Publishing, p. 184. (2019). ISBN 978–613–9–88956–3
- [3] Al_Issa H.A., Drechny M., Trnad I., Qawaqzeh M., Kuchanskyy V., Rubanenko O., Kudria S., Vasko P., Miroshnyk O., Shchur T. Assessment of the Effect of Corona Discharge on Synchronous Generator Self-Excitation. Energies. 2022; 15(6):2024. <https://doi.org/10.3390/en15062024>
- [4] Кузнецов В. Г. Використання штучної нейронної мережі для визначення характеристик аномальних перенапруг / В. Г. Кузнецов, В. В. Кучанський, Ю. І. Тугай // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України : збірник наукових праць. 2012. № 31.– С. 5–11.

- [5] Kuchansky V., Rubanenko O., Influence assesment of autotransformer remanent flux on resonance overvoltage. UPB Scientific Bulletin, Series C: Electrical Engineering and Computer Science. 2020. №82(3). P. 233-250.
- [6] Тугай Ю.І., Кучанський В.В., Лиховид Ю.Г. Вплив початкових умов на перехідні процеси при комутаціях автотрансформаторів. Вісник Харківського національного технічного університету імені Петра Василенка «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». 2019 № 203 С.59-60.

Кузнецов Володимир Григорович — д-р техн. наук, професор, член-кореспондент НАН України, головний науковий співробітник відділу оптимізації систем електропостачання;

Кучанський Владислав Володимирович — канд. техн. наук, старший дослідник, завідувач відділу оптимізації систем електропостачання, e-mail: kuchanskiyvladislav@gmail.com ;

Тугай Юрій Іванович — д-р техн. наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник відділу оптимізації систем електропостачання;

Тугай Ірина Юріївна — канд. техн. наук, старший науковий співробітник відділу оптимізації систем електропостачання.

Kuznetsov Volodymyr Grigorovich — Doctor of Technical Sciences, Professor, Corresponding Member of the NAS of Ukraine, Chief Researcher of the Department of Optimization of Power Supply Systems;

Kuchansky Vladislav Volodymyrovych — Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Head of the Department of Optimization of Power Supply Systems, e-mail: kuchanskiyvladislav@gmail.com ;

Tugay Yuriy Ivanovych — Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Leading Research Associate of the Department of Optimization of Power Supply Systems;

Tugay Iryna Yuriivna — Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher of the Department of Optimization of Power Supply Systems.

ВДОСКОНАЛЕНЕ КЕРУВАННЯ ВІРТУАЛЬНИМ СИНХРОННИМ ГЕНЕРАТОРОМ ДЛЯ ПАРАЛЕЛЬНИХ ІНВЕРТОРІВ У МІКРОМЕРЕЖАХ

¹ Національна академія наук України Інститут електродинаміки, Київ, Україна

Анотція

Досвід систем, таких як ERCOT (Техас) та ENTSO-E (Європа), свідчить про зниження інерційності у разі збільшення частки відновлюваної енергії. Це зумовлює необхідність упровадження додаткових механізмів підтримки інерції. Відповідно, деякі мережеві кодекси, наприклад у Європі, зобов'язують вітрові електростанції забезпечувати інерційну відповідь. Подібні вимоги запроваджено й в Індонезії для блоків розподіленої генерації (DG), підключених до магістральної мережі, щоб утримувати електричні параметри, зокрема частоту та напругу, у допустимих межах.

Ключові слова: віртуальна інерція, розподілена генерація, мікромережі, системні аварії.

Abstract

The experience of systems such as ERCOT (Texas) and ENTSO-E (Europe) demonstrates a decline in system inertia as the share of renewable energy increases. This necessitates the implementation of additional inertia support mechanisms. Accordingly, some grid codes—for example, in Europe—require wind power plants to provide an inertial response. Similar requirements have also been introduced in Indonesia for distributed generation (DG) units connected to the transmission network to maintain electrical parameters, particularly frequency and voltage, within permissible limits.

Keywords: virtual inertia, distributed generation, microgrids, system failures..

Зростаюча інтеграція відновлюваних джерел енергії трансформує енергетичні системи від централізованих архітектур на основі синхронних генераторів до більш децентралізованих і інверторно-орієнтованих. Проте цей перехід супроводжується істотним зниженням інерції системи, що створює виклики для забезпечення стабільності частоти. Для подолання цієї проблеми запропоновано різні стратегії керування, спрямовані на імітацію інерційної реакції традиційних синхронних генераторів, відомі під загальною назвою віртуальна інерція.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Guerrero, J.; Blaabjerg, F.; Zhelev, T.; Hemmes, K.; Monmasson, E.; Jemei, S.; Comech, M.; Granadino, R.; Frau, J. Distributed Generation: Toward a New Energy Paradigm. IEEE Ind. Electron. Mag. 2010, 4, 52–64, doi:10.1109/MIE.2010.935862.
- [2] UNFCCC The Paris Agreement -Publication Available online: <https://unfccc.int/documents/184656> (accessed on 12 March 2024) UNFCCC Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change 2005.
- [3] Trinh, V.L.; Chung, C.K. Renewable Energy for SDG-7 and Sustainable Electrical Production, Integration, Industrial Application, and Globalization: Review. Clean. Eng. Technol. 2023, 15, 100657, doi:10.1016/j.clet.2023.100657.463

Кучанський Владислав Володимирович — канд. техн. наук, старший дослідник, завідувач відділу оптимізації систем електропостачання, e-mail: kuchanskiyvladislav@gmail.com ;

Тугай Юрій Іванович — д-р техн. наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник відділу оптимізації систем електропостачання;

Шевчук Віталій Вадимович – доктор філософії, науковий співробітник відділу оптимізації систем електропостачання.

Kuchansky Vladislav Volodymyrovych — Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Head of the Department of Optimization of Power Supply Systems, e-mail: kuchanskiyvladislav@gmail.com ;

Tugay Yuriy Ivanovych — Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Leading Researcher of the Department of Optimization of Power Supply Systems;

Shevchuk Vitaliy Vadymovich – Doctor of Philosophy, Researcher of the Department of Optimization of Power Supply Systems.

ОСОБЛИВОСТІ АРХІТЕКТУРИ КОМІРКОВИХ ЛОКАЛЬНИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ З ДЖЕРЕЛАМИ РОЗОСЕРЕДЖЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ

¹ Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

Анотація

У роботі розглянуто архітектурні особливості коміркових локальних електроенергетичних систем критичної інфраструктури з використанням джерел розосередженої генерації. На основі аналізу сучасних підходів до побудови мікромереж визначено переваги коміркової архітектури, яка забезпечує підвищену живучість і масштабованість систем енергопостачання об'єктів критичної інфраструктури. Особливу увагу приділено інтеграції відновлюваних джерел енергії та систем накопичення енергії, що дозволяють забезпечити автономне функціонування таких систем у автономному режимі..

Ключові слова: коміркова архітектура, локальні електроенергетичні системи, мікромережі, розосереджена генерація, критична інфраструктура, ієрархічні моделі.

Abstract

The paper discusses the architectural features of cell-based microgrids for critical infrastructure that utilize distributed generation sources. Based on an analysis of current microgrid architectures, the advantages of a cell-oriented structure are highlighted, including enhanced resilience and scalability. Special attention is given to the integration of renewable energy sources and energy storage systems that enable autonomous operation in islanded mode.

Keywords: cellular architecture, local power systems, microgrids, distributed generation, critical infrastructure, hierarchical models.

Вступ

Сучасна енергетика зазнає трансформації у напрямі децентралізації, цифровізації та підвищення стійкості до зовнішніх впливів. Особливої актуальності ці тенденції набувають для об'єктів критичної інфраструктури, які повинні зберігати працездатність навіть за умов аварій чи порушення централізованого енергопостачання.

Одним із перспективних рішень є створення коміркових локальних електроенергетичних систем (ЛЕС) з джерелами розосередженої генерації (РГ). Такі системи базуються на принципах мікромережевої архітектури, яка поєднує локальні генератори, системи накопичення енергії, споживачів та інтелектуальні засоби керування.

Результати дослідження

Коміркова архітектура ЛЕС передбачає поділ енергосистеми на окремі модулі – енергетичні комірки, які можуть функціонувати незалежно або у складі інтегрованої мікромережі. Кожна комірка включає один або декілька джерел розосередженої генерації (сонячні панелі, вітрові турбіни, мікотурбіни, паливні елементи), систему накопичення енергії та локальні навантаження (рис. 1). Такий підхід забезпечує високу живучість системи, оскільки відмова однієї комірки не призводить до зупинки всієї інфраструктури.

Для об'єктів критичної інфраструктури оптимальною є коміркова децентралізована архітектура з ієрархічним керуванням і резервованими каналами зв'язку, побудованими за стандартом ІЕС 61850. Застосування адаптивних і інтелектуальних алгоритмів керування дозволяє автоматично балансувати потужності та підтримувати параметри якості електроенергії навіть у режимі ізоляції від централізованої мережі.

Коміркові локальні електроенергетичні системи з джерелами розосередженої генерації є перспективним напрямом розвитку енергетичних мереж критичної інфраструктури. Вони забезпечують високу надійність, гнучкість і енергетичну незалежність, що є ключовими вимогами в умовах триваючої агресії.

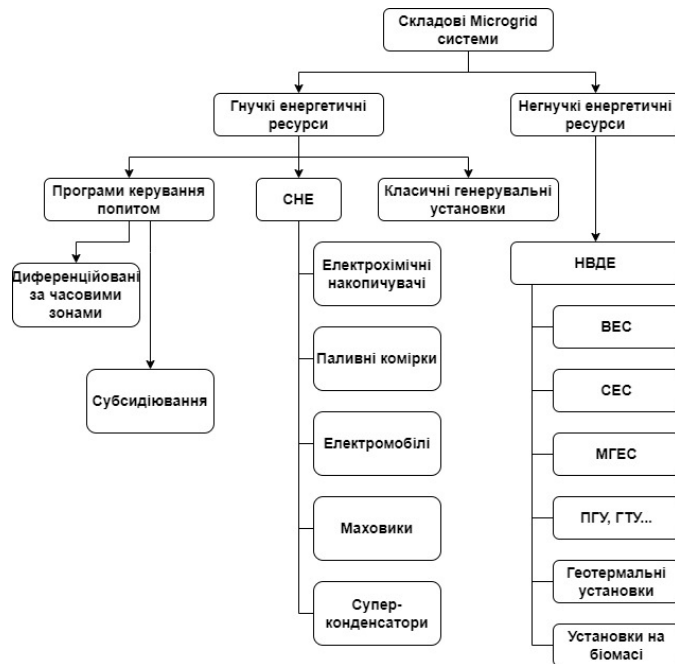


Рис. 1. – Складові коміркових локальних електроенергетичних систем

Важливою складовою коміркових ЛЕС є системи накопичення енергії, які відіграють роль буфера між генерацією та споживанням, компенсуючи коливання навантаження та потужності від ВДЕ. Використання літій-іонних батарей, суперконденсаторів, водневих паливних комірок або гібридних систем дозволяє суттєво підвищити стабільність та ефективність роботи таких ЛЕС. При цьому, розміщення накопичувачів на рівні окремих комірок забезпечує модульність і масштабованість системи.

Висновки

Коміркові локальні електроенергетичні системи з джерелами розосередженої генерації забезпечують підвищення рівня енергетичної безпеки та автономності об'єктів критичної інфраструктури. Вони дозволяють гнучко інтегрувати різноманітні джерела генерації, підвищують живучість системи та зменшують залежність від централізованих електричних мереж.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Mariam, L., Basu, M., & Conlon, M. F. (2013). A Review of Existing Microgrid Architectures. Journal of Engineering, Hindawi Publishing Corporation. DOI: 10.1155/2013/937614.
2. Gomes, M., Bandejas, F., Coelho, P., Fernandes, J., & Castilla, M. (2019). Microgrid Architecture Evaluation for Small and Medium Size Industries. International Journal of Energy Economics and Policy Studies.
3. Tabatabaei, N. M., Kabalci, E., & Bizon, N. (Eds.). (2020). Microgrid Architectures, Control and Protection Methods. Springer Nature Switzerland AG. DOI: 10.1007/978-3-030-23723-3.

Дерев'янюк Денис Григорович — д-р. техн. наук, доцент, в.о. завідувача кафедри автоматизації енергосистем, КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ

Белоха Галина Сергіївна — канд. техн. наук, доцент кафедри електропостачання, КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ

Derevyanko Denys Grigorovich — Dr. Sc. (Eng.), Associate Professor, Acting Head of the Department of Power Systems Automation, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", **Kyiv**

Belokha Halyna Serhiivna — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the Power Supply Department, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", **Kyiv**

О.С. Яндульський
В.С. Гулий
А. А. Марченко
О. В. Тимохін
А. Б. Нестерко

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ТЕС ПРИ РЕГУЛЮВАННІ ЧАСТОТИ ТА АКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ЕНЕРГОСИСТЕМІ

Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського

Анотація

Аналіз режимів роботи енергоблоків ТЕС показав наявність значних коливань керуючих сигналів регулюючого обладнання, що прискорюють його знос. Запропонований підхід застосування фільтрів сигналів керування серводвигуна зменшила коливання, забезпечила стабільність частоти та підвищила надійність і ефективність роботи енергоблоків.

Ключові слова: первинне регулювання частоти та активної потужності, теплова електрична станція, режими роботи енергосистеми, система керування, моделювання.

Abstract

The analysis of the operating modes of TPP units revealed significant fluctuations in the control signals of regulating equipment, which accelerate its wear. The proposed approach, involving the use of servo control signal filters, reduced these fluctuations, ensured frequency stability, and improved the reliability and efficiency of the power units.

Keywords: primary frequency and active power control, thermal power plant, power system operating modes, control system, modeling.

Проведений аналіз режимів роботи енергоблоків ТЕС при регулюванні частоти та активної потужності в енергосистемі показав наявність значних коливань сигналів керування регулюючого обладнання, які не завжди призводять до відповідної зміни вихідної потужності турбіни, але спричиняють підвищене навантаження і прискорений знос регулюючого обладнання.

Запропонований підхід фільтрації сигналів керуючих впливів дозволив суттєво зменшити амплітуду коливань сигналів серводвигуна, забезпечити стабільність і точність регулювання частоти згідно нормативних вимог, підвищити ефективність і надійність роботи регулюючого обладнання ТЕС, що приймають участь у первинному регулюванні частоти та активної потужності в енергосистемі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Про затвердження Кодексу системи передачі : Постанова Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг (НКРЕКП) від 14.03.2018 № 309. [Online]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0309874-18#Text> (дата звернення: 28.05.2023).
2. O. Yandulskiy, A. Marchenko and V. Hulyi, "Analysis of Efficiency Of Primary Load-Frequency Control of Integrated Power System of Ukraine," 2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), Kharkiv, Ukraine, 2018, pp. 244-247.
3. Oleksandr Yandulskiy, Volodymyr Hulyi, Artem Nesterko, Mykhailo Kovalenko, Oleksandr Tymokhin Improving the efficiency of secondary load frequency control in a power system considering internal tie-line power exchanges. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies Vol. 4 No. 8 (136) (2025): Energy-saving technologies and equipment -2025 y.- 6-15p.
4. Shouran, Mokhtar, and Elmazeg Elgamli. "Design and implementation of Butterworth filter." Int. J. Innov. Res. Sci. Eng. Technol 9.9 (2020): 7975-7983.
5. L. Ely de Lacerda de Oliveira, L. E. B. da Silva, V. F. da Silva, G. L. Torres, E. L. Bonaldi, "Real-time determination of the best interval of calculation for moving averages used for DC value extraction in active power filter control methods", Proc. 28th IEEE IECON, 2002, vol. 2, pp. 1526-1531.

Яндульський Олександр Станіславович – д.т.н., професор, Україна, м. Київ, Національний технічний

університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», кафедра автоматизації енергосистем, професор, тел.: (044) 236-41-11.

Гулий Володимир Сергійович – асистент, Україна, м. Київ, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», кафедра автоматизації енергосистем, асистент, тел.: (044) 454-93-08, e-mail: vladimir_hulyi@ukr.net.

Марченко Анатолій Андрійович – к.т.н., доцент, Україна, м. Київ, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», кафедра автоматизації енергосистем, доцент, тел.: (044) 454-93-08, e-mail: marchenko_ae@ukr.net;

Тимохін Олександр Вікторович – к.т.н., ст. викл., Україна, м. Київ, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», кафедра автоматизації енергосистем, ст. викл., тел.: (044) 454-93-08, e-mail: timohin_ae@ukr.net;

Нестерко Артем Борисович – к.т.н., доцент, Україна, м. Київ, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», кафедра автоматизації енергосистем, доцент, тел.: (044) 236-41-11, e-mail: watefir@gmail.com.

Yandulsky Oleksandr Stanislavovych – Doctor of Technical Sciences, Professor, Ukraine, Kyiv, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Department of Power Systems Automation, Professor, tel.: (044) 236-41-11.

Huly Volodymyr Serhiyovych – Assistant, Ukraine, Kyiv, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Department of Power Systems Automation, Assistant, tel.: (044) 454-93-08, e-mail: vladimir_hulyi@ukr.net.

Marchenko Anatoliy Andriyovych – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Ukraine, Kyiv, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Department of Power Systems Automation, Assistant, tel.: (044) 454-93-08, e-mail: vladimir_hulyi@ukr.net. Igor Sikorsky", Department of Power Systems Automation, Associate Professor, tel.: (044) 454-93-08, e-mail: marchenko_ae@ukr.net;

Tymokhin Oleksandr Viktorovych - Ph.D., Senior Lecturer, Ukraine, Kyiv, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Department of Power Systems Automation, Senior Lecturer, tel.: (044) 454-93-08, e-mail: timohin_ae@ukr.net;

Nesterko Artem Borysovych - Ph.D., Associate Professor, Ukraine, Kyiv, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Department of Power Systems Automation, Associate Professor, tel.: (044) 236-41-11, e-mail: watefir@gmail.com.

ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ПЕРЕВЕДЕННЯ МІЖДЕРЖАВНОЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ ЗАХІДНОУКРАЇНСЬКА-САБОЛЧБАКА НА НОМІНАЛЬНУ НАПРУГУ 400 КВ

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

Анотація

У статті розглянуто технічну та енергетичну доцільність переведення міждержавної повітряної лінії електропередачі «Західноукраїнська – Саболчбака» з номінальної напруги 750 кВ на 400 кВ у габаритах існуючої лінії. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення ефективності роботи об'єднаної енергосистеми України, посилення її стійкості та інтеграції з енергоринком Європейського Союзу. Одним із ключових елементів міждержавного енергетичного перетину є лінія 750 кВ «Західноукраїнська – Саболчбака», для робочих режимів якої характерні суттєві втрати електроенергії зумовлені коронним розрядом. У роботі наведено результати моделювання режимів роботи транзиту Україна – Угорщина, виконаного у програмному середовищі PowerFactory для двох варіантів експлуатації лінії – на напрузі 750 кВ і 400 кВ. Проведено порівняльний аналіз втрат активної потужності: джоулевих і втрат на корону, враховано вплив погодних умов (ясна погода, дощ, сніг, паморозь) та різних рівнів навантаження. Розрахунки показали, що при напрузі 750 кВ втрати на коронний розряд переважають над джоулевими, особливо за несприятливих погодних умов, тоді як у варіанті 400 кВ частка втрат на корону суттєво знижується, але зростають джоулеві втрати. Встановлено, що зниження номінальної напруги до 400 кВ є енергоефективним лише при порівняно невеликих навантаженнях лінії – до 200 МВт за ясної погоди, до 400 МВт під час снігу, 750 МВт за дощу та 950 МВт за паморозі. За більших перетоків потужності доцільно зберігати напругу 750 кВ, оскільки сумарні втрати при цьому менші.

Ключові слова: міждержавна електропередача, надвисока напруга, втрати потужності, коронний розряд, втрати на корону, PowerFactory, енергоефективність.

Abstract

The article discusses the technical and energy feasibility of converting the inter-state overhead power line “Western Ukraine – Szabolcsbánya” from a nominal voltage of 750 kV to 400 kV within the dimensions of the existing line. The relevance of the study is determined by the need to improve the efficiency of the unified energy system of Ukraine, strengthen its stability, and integrate it with the energy market of the European Union. One of the key elements of the interstate energy intersection is the 750 kV “Western Ukraine – Szabolcsbánya” line, whose operating modes are characterized by significant power losses due to corona discharge. The paper presents the results of modeling the Ukraine-Hungary transit operating modes, performed in the PowerFactory software environment for two line operation options – at 750 kV and 400 kV. A comparative analysis of active power losses (Joule losses and corona losses) was performed, taking into account the influence of weather conditions (clear weather, rain, snow, frost) and different load levels. The calculations showed that at a voltage of 750 kV, corona discharge losses prevail over Joule losses, especially in unfavorable weather conditions, while in the 400 kV option, the share of corona losses is significantly reduced, but Joule losses increase. It has been established that reducing the nominal voltage to 400 kV is energy efficient only at relatively low line loads – up to 200 MW in clear weather, up to 400 MW during snow, 750 MW during rain, and 950 MW during frost. For larger power flows, it is advisable to maintain a voltage of 750 kV, as the total losses are lower in this case.

Keywords: interstate power transmission, extra-high voltage, power losses, corona discharge, corona losses, PowerFactory, energy efficiency.

У статті розглянуто питання енергетичної та технічної доцільності переведення міждержавної повітряної лінії електропередачі «Західноукраїнська – Саболчбака» з номінальної напруги 750 кВ на 400 кВ. Актуальність дослідження визначається стратегічними завданнями ПрАТ «НЕК «Укренерго» щодо посилення стійкості об'єднаної енергосистеми України, підвищення її надійності, а також інтеграції з

європейською енергомережою ENTSO-E. У зв'язку з цим особливого значення набуває підвищення ефективності функціонування міждержавних електричних перетинів, серед яких лінія «Західноукраїнська – Саболчбака» є однією з найпотужніших та найважливіших для транзиту електроенергії між Україною та Угорщиною.

Після модернізації підстанцій та відновлення роботи лінії у 2020 році було створено транзитну схему «Західноукраїнська – Саболчбака – Альбертірша», частина якої експлуатується на напрузі 400 кВ. Метою роботи є визначення технічної доцільності такого переведення та оцінка зміни втрат електроенергії за різних режимів навантаження і погодних умов. Для досягнення мети розроблено розрахункову модель транзиту Україна – Угорщина у програмному середовищі PowerFactory, що включає міждержавну лінію «Західноукраїнська – Саболчбака» та суміжні електропередачі. У межах дослідження виконано серію моделювань для двох варіантів номінальної напруги лінії – 750 кВ та 400 кВ, а також проведено розрахунок джоулевих втрат і втрат потужності на корону відповідно до нормативних даних для різних погодних умов (ясна погода, дощ, сухий сніг, паморозь).

Результати моделювання показали, що для існуючої схеми з напругою 750 кВ втрати на коронний розряд суттєво перевищують джоулеві втрати, особливо за паморозі та дощу. Частка втрат на корону може сягати 60–70% від загальних втрат активної потужності. При зниженні напруги до 400 кВ втрати на корону зменшуються, проте збільшуються джоулеві втрати унаслідок підвищення робочого струму. Сумарний ефект залежить від рівня навантаження: за малих потоків (до 200 МВт) експлуатація на 400 кВ є енергоефективнішою, тоді як при великих навантаженнях (>700–800 МВт) втрати потужності у варіанті 400 кВ перевищують втрати у варіанті 750 кВ.

На основі порівняльного аналізу визначено критичні значення навантаження, при яких варіант 400 кВ стає менш ефективним: близько 200 МВт за ясної погоди, 400 МВт за снігу, 750 МВт під час дощу та 950 МВт за паморозі.

Таким чином, переведення лінії «Західноукраїнська – Саболчбака» на номінальну напругу 400 кВ в габаритах існуючої лінії дозволяє суттєво скоротити втрати на коронний розряд у режимах порівняно невеликих навантажень, однак при збільшенні навантаження загальні втрати зростають за рахунок джоулевої складової. Отримані результати дають змогу зробити висновок, що вибір оптимального режиму експлуатації має базуватися на реальному профілі навантажень та погодних умовах, а остаточне рішення про переведення напруги повинно враховувати не лише енергетичні, а й економічні показники, вплив на баланс реактивної потужності та надійність транзиту електроенергії між Україною та Угорщиною.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Yaremak I. EU–Ukraine Cross-Border Energy Cooperation: Trends and Directions for Post-War Reconstruction. *Borders in Globalization Review*. 2025. Vol. 6, no. 2. URL: https://doi.org/10.18357/big_r62202522129 (date of access: 18.10.2025).
- [2] Regional Investment Plan Continental Central East / A. Kasembe et al. 2023. URL: <https://tyndp.entsoe.eu/resources/regional-investment-plan-2022-continental-central-east> (date of access: 18.10.2025).
- [3] Determination of active power losses components in long-distance ac power transmission / T. L. Katsadze et al. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2022. Vol. 2022, no. 4. P. 54–58. URL: <https://doi.org/10.15407/techned2022.04.054> (date of access: 18.10.2025).
- [4] TB 838 - Coatings for protecting overhead power networks against icing, corona noise, corrosion and reducing their visual impact. Paris : CIGRE 838, 2021.
- [5] Gupta P. K., Tuttelberg K., Kilter J. Weather dependency of corona losses on 330 kV overhead transmission lines. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2024. Vol. 155. P. 109537. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.109537> (date of access: 18.10.2025).
- [6] СОУ-Н ЕЕ 40.1.3741933.82: 2013. Методичні рекомендації визначення технологічних витрат електричної енергії в трансформаторах і лініях електропередавання. Вид. офіц. 2013. 88 с.

Кацадзе Теймураз Луарсавович — канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри електричних мереж та систем КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, e-mail: teymuraz@ukr.net

Луїн Денис Максимович — магістрант, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ

Katsadze Teimuraz — Cand. Sc. (Eng), Head of the Department of Electrical Networks and Systems, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, e-mail: teymuraz@ukr.net

Denys Luhin — Master's student, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv

**Т. Л. Кацадзе
В. А. Баженов
Н. В. Буслова
О. М. Янковська
К. М. Новіков**

ДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ ЗАРЯДНОЇ ЄМНОСТІ МАГІСТРАЛЬНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ З УРАХУВАННЯМ МЕТЕОРОЛОГІЧНИХ ФАКТОРІВ

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

Анотація

У статті досліджено вплив метеорологічних умов на зарядну ємність повітряних ліній електропередавання та розроблено підхід до моніторингу стану проводів у змінних метеорологічних умовах. Показано, що зміни температури, вітрового тиску та утворення ожеледі зумовлюють варіації стріли провисання проводу, що призводить до зміни його просторового положення та, відповідно, зарядної ємності лінії. Наведено результати математичного моделювання, які дозволили кількісно оцінити вплив температурних коливань та обмерзання на ємнісні параметри магістральних ліній. Встановлено, що температурні зміни в діапазоні від -30°C до $+70^{\circ}\text{C}$ можуть викликати зміну зарядної ємності приблизно на 1%, а утворення шару ожеледі завтовшки до 40 мм – збільшення ємності до 1,5%. Такі відхилення незначні для розподільчих мереж, але можуть бути критичними для протяжних магістральних ліній надвисокої напруги. Розроблено уточнені математичні моделі, які враховують вплив провисання проводу на зарядну ємність, та аналітичні співвідношення між стрілою провисання, температурою та кутом нахилу проводу в прогоні. Особливу увагу приділено інклінометричному підходу як одному з найбільш ефективних і технологічно простих методів контролю стану проводу. Встановлено майже лінійний зв'язок між кутом нахилу сенсора та стрілою провисання для прольотів довжиною від 100 до 450 м, що дає змогу непрямо визначати як температуру проводу, так і масу відкладень ожеледі. На основі отриманих залежностей розроблено алгоритми роботи пристрою моніторингу, які реалізують два режими – постійний контроль провисання та контроль лише в діапазоні температур, за яких спостерігаються відкладення ожеледі.

Ключові слова: повітряна лінія електропередавання, зарядна ємність, метеорологічні фактори, провисання проводу, інклінометричний моніторинг, ожеледь, динамічна модель, Smart Grid

Abstract

The article investigates the influence of meteorological conditions on the charging capacity of overhead power lines and develops an approach to monitoring the condition of wires in changing meteorological conditions. It is shown that changes in temperature, wind pressure, and ice formation cause variations in the sag of the wire, which leads to a change in its spatial position and, accordingly, the charging capacity of the line. The results of mathematical modeling are presented, which allowed a quantitative assessment of the influence of temperature fluctuations and icing on the capacitive parameters of main lines. It has been established that temperature changes in the range from -30°C to $+70^{\circ}\text{C}$ can cause a change in charging capacity of approximately 1%, and the formation of an ice layer up to 40 mm thick can cause an increase in capacity of up to 1.5%. Such deviations are insignificant for distribution networks, but can be critical for long overhead lines of ultra-high voltage. Refined mathematical models have been developed that take into account the influence of wire sag on charging capacity, as well as analytical relationships between sag, temperature, and the angle of inclination of the wire in the span. Particular attention is paid to the inclinometric approach as one of the most effective and technologically simple methods of monitoring the condition of the wire. An almost linear relationship has been established between the angle of inclination of the sensor and the sag for spans ranging in length from 100 to 450 m, which makes it possible to indirectly determine both the temperature of the wire and the mass of ice deposits. Based on the obtained dependencies, algorithms have been developed for the operation of the monitoring device, which implement two modes: continuous monitoring of sag and monitoring only in the temperature range at which icing deposits are observed.

Keywords: overhead power line, charging capacity, meteorological factors, wire sag, inclinometric monitoring, ice, dynamic model, Smart Grid

Сучасні тенденції розвитку електроенергетичних систем базуються на створенні гнучких, саморегульованих мереж, здатних адаптуватися до змін навантаження, кліматичних умов та параметрів зовнішнього середовища. Важливою умовою їх стабільної роботи є точне моделювання електричних параметрів ліній електропередавання, зокрема зарядної ємності, яка істотно впливає на режим напруги, розподіл струмів та потоків потужності в мережі. У магістральних мережах надвисокої напруги похибки

у визначенні ємності можуть призвести до неправильного налаштування пристроїв компенсації реактивної потужності, перевантаження елементів мережі та зниження її енергоефективності.

Одним із напрямів підвищення точності розрахунків є врахування впливу провисання проводів у прогоні, що зумовлюється як геометричними характеристиками опор, так і зміною температури навколишнього середовища, вітрових та ожеледних навантажень. Традиційна методика визначення зарядної ємності ґрунтується на припущенні про горизонтальне розташування фазних проводів, що справедливе лише для коротких прогонів або малих стріл провисання. Для магістральних ліній надвисокої напруги така модель може спричиняти значну похибку.

У роботі представлено вдосконалену математичну модель розрахунку зарядної ємності повітряної лінії, яка враховує реальну форму кривої провисання проводу, апроксимовану параболою. Запропоновано уточнені вирази для визначення власних та взаємних потенційних коефіцієнтів проводів з урахуванням зміни їхньої висоти над поверхнею землі вздовж прогону. Модель забезпечує підвищення точності визначення погонної ємності, особливо для довгих прогонів із великою стрілою провисання. Розрахунки для типових конструкцій ліній напругою 35–750 кВ показали, що похибка традиційної моделі становить до 1–2 % для трикутного розташування проводів і до 5–6 % для горизонтального. Такі відхилення можуть призводити до помітних змін у балансі реактивної потужності магістральних мереж. Збільшення номінальної напруги лінії, довжини прольоту та стріли провисання підсилює вплив цього ефекту.

Окремо досліджено зміну зарядної ємності обумовлену кліматичними факторами – температурного режиму та відкладення ожеледі. Моделювання показало, що при зміні робочої температури проводу в діапазоні від $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$ зарядна ємність змінюється до 1 %, а при товщині шару ожеледі до 40 мм – до 1,5%. Для розподільних ліній така різниця є несуттєвою, однак для магістральних електропередач надвисокої напруги великої довжини це може зумовлювати перерозподіл реактивної потужності та порушення узгодженого режиму роботи енергооб’єднання.

З метою практичного урахування цих факторів у роботі запропоновано концепцію пристрою моніторингу стану проводу повітряної лінії. Пристрій ґрунтується на вимірюванні кута нахилу кривої провисання поблизу точки закріплення проводу на опорі. Такий підхід забезпечує простоту, точність і надійність контролю. Встановлено майже лінійний зв’язок між кутом нахилу проводу та стрілою провисання для прольотів довжиною 100–450 м. Збільшення стріли провисання на 1 м зумовлює зміну кута нахилу приблизно на $0,5\text{--}2^{\circ}$, що дозволяє здійснювати точні розрахунки за допомогою інклінометричних сенсорів.

Удосконалена система моніторингу передбачає інтеграцію датчика температури, що забезпечує можливість оцінки маси відкладень ожеледі за результатами зміни кута нахилу проводу та його температури. Додаткове оснащення триосовим гіроскопом дозволяє здійснювати контроль вітрових навантажень, просторових коливань проводу та зближення фаз. Алгоритми роботи пристрою реалізують два режими: постійний моніторинг і контроль лише в умовах формування ожеледі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Decomposition-Based Stacked Bagging Boosting Ensemble for Dynamic Line Rating Forecasting / A. Ahmadi et al. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2023. P. 1–10. URL: <https://doi.org/10.1109/tpwrd.2023.3267511> (date of access: 20.10.2025).
- [2] Hierarchical Extreme Learning Machine Enabled Dynamic Line Rating Forecasting / A. Mansour Saatloo et al. *IEEE Systems Journal*. 2021. P. 1–11. URL: <https://doi.org/10.1109/jsyst.2021.3128213> (date of access: 20.10.2025).
- [3] Glaum P., Hofmann F. Enhancing the German Transmission Grid Through Dynamic Line Rating. 2022 18th International Conference on the European Energy Market (EEM), Ljubljana, Slovenia, 13–15 September 2022. 2022. URL: <https://doi.org/10.1109/eem54602.2022.9921148> (date of access: 20.10.2025).
- [4] Gupta P. K., Tuttleberg K., Kilter J. Weather dependency of corona losses on 330 kV overhead transmission lines. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2024. Vol. 155. P. 109537. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.109537> (date of access: 20.10.2025).
- [5] Riba J.-R., Moreno-Eguilaz M. Analyzing the effect of corona losses on dynamic line rating models for overhead transmission lines. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2025. Vol. 166. P. 110546. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2025.110546> (date of access: 20.10.2025).
- [6] Yin F., Farzaneh M., Jiang X. Corona investigation of an energized conductor under various weather conditions. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2017. Vol. 24, no. 1. P. 462–470. URL: <https://doi.org/10.1109/rdei.2016.006302> (date of access: 20.10.2025).
- [7] Karimi S., Musilek P., Knight A. M. Dynamic thermal rating of transmission lines: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 91. P. 600–612. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.001> (date of access: 20.10.2025).
- [8] A Digital Twin Approach for Improving Estimation Accuracy in Dynamic Thermal Rating of Transmission Lines / G. M. Paldino et al. *Energies*. 2022. Vol. 15, no. 6. P. 2254. URL: <https://doi.org/10.3390/en15062254> (date of access: 20.10.2025).
- [9] Olatunji Ahmed L. Prospects of using Dynamic Thermal Rating for a Reliable Power System Network: A Review. 2021 IEEE International Future Energy Electronics Conference (IFEEEC), Taipei, Taiwan, 16–19 November 2021. 2021. URL: <https://doi.org/10.1109/ifeec53238.2021.9661878> (date of access: 20.10.2025).
- [10] Grigsby L. L. *Electric Power Generation, Transmission, and Distribution*. Taylor & Francis Group, 2018. 789 p.

- [11] Hase Y. Handbook of Power Systems Engineering with Power Electronics Applications. Chichester, UK : John Wiley & Sons, Ltd, 2012. URL: <https://doi.org/10.1002/9781118443156> (date of access: 20.10.2025).
- [12] Кацадзе Т.Л. Основи механічних розрахунків повітряних ліній електропередавання : Підручник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во "Політехніка", 2019. 336 с.
- [13] Measurement and monitoring of overhead transmission line sag in smart grid: A review / A. U. Mahin et al. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2021. URL: <https://doi.org/10.1049/gtd2.12271> (date of access: 20.10.2025).
- [14] Chen Y., Ding X. A survey of sag monitoring methods for power grid transmission lines. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2023. URL: <https://doi.org/10.1049/gtd2.12778> (date of access: 20.10.2025).
- [15] Research on Sag Online Monitoring System for Power Transmission Wire Based on Tilt Measurement / X. Xiao et al. *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*. 2013. Vol. 2, no. 1. P. 6–11. URL: <https://doi.org/10.12720/sgce.2.1.6-11> (date of access: 20.10.2025).
- [16] Malhara S., Vittal V. Mechanical State Estimation of Overhead Transmission Lines Using Tilt Sensors. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2010. Vol. 25, no. 3. P. 1282–1290. URL: <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2009.2038703> (date of access: 20.10.2025).

Кацадзе Теймураз Луарсавович — канд. техн. наук, завідувач кафедри електричних мереж та систем КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, e-mail: teymuraz@ukr.net

Баженов Володимир Андрійович — канд. техн. наук, доцент кафедри електричних мереж та систем КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ

Буслова Найна Володимирівна — канд. техн. наук, доцент кафедри електричних мереж та систем КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ

Янковська Олена Максимівна — ст. викладач кафедри електричних мереж та систем КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ

Новіков Кирило Михайлович — аспірант, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ

Katsadze Teimuraz — Cand. Sc. (Eng), Head of the Department of Electrical Networks and Systems, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, e-mail: teymuraz@ukr.net

Volodymyr Bazhenov — Cand. Sc. (Eng), Associate Professor, Department of Electrical Networks and Systems, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv

Naina Buslova — Cand. Sc. (Eng), Associate Professor, Department of Electrical Networks and Systems, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv

Olena Yankoska — Senior Lecturer, Department of Electrical Networks and Systems, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv

Kyrylo Novikov — postgraduate student, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv

БАЛАНСУВАННЯ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ГРАВІТАЦІЙНИХ СИСТЕМ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ

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

Анотація

У роботі розглянуто актуальну проблему підвищення стабільності режимів електричних мереж в умовах зростання частки відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Нестабільність генерації сонячних та вітрових електростанцій призводить до дисбалансів потужності, коливань напруги та частоти, що потребує впровадження вискоєфективних систем накопичення енергії (СНЕ). Особливу увагу приділено гравітаційним системам накопичення енергії (ГСНЕ), які ґрунтуються на перетворенні електричної енергії у потенційну за рахунок підняття масивних вантажів та подальшому її відновленні під час опускання. Такі системи характеризуються високою надійністю, тривалим терміном служби, низькими експлуатаційними витратами та екологічною безпечністю, що робить їх перспективними для балансування режимів роботи електричних мереж з великою часткою ВДЕ. Проаналізовано технічні, економічні та алгоритмічні проблеми інтеграції ГСНЕ у структуру розподільних мереж. Показано, що основним обмежувальним фактором є значна механічна інерція, яка знижує швидкодію системи і унеможливує її використання для первинного регулювання частоти. Разом із тим, ГСНЕ ефективно виконують функції вторинного та третинного регулювання, згладжують добові коливання навантаження, забезпечують енергетичний резерв та зменшують технологічні втрати. Розглянуто можливість застосування гібридних схем на основі поєднання ГСНЕ з електронними компенсаторами потужності (STATCOM), що підвищує якість електроенергії та стабільність напруги. Представлено концептуальну постановку задачі оптимізації інтеграції ГСНЕ у електричні мережі з урахуванням технічних, економічних і фізичних обмежень. Наведено цільову функцію максимізації загальної рентабельності капіталовкладень, яка поєднує критерії оператора системи накопичення енергії та оператора системи розподілу. Визначено ключові обмеження моделі: за ємністю, потужністю, швидкістю зміни енергетичного стану, допустимими рівнями напруги й струмового навантаження. Для розв'язання задачі рекомендовано застосування комбінованих підходів, зокрема, методів декомпозиції, евристичних алгоритмів та аналітичних методів на основі еквівалентних схем.

Ключові слова: гравітаційна система накопичення енергії, балансування режимів, відновлювані джерела енергії, оптимізація, електрична мережа, енергетичний баланс, енергоефективність

Abstract

The paper considers the topical issue of improving the stability of electrical networks in conditions of growing share of renewable energy sources (RES). The instability of solar and wind power generation leads to power imbalances, voltage and frequency fluctuations, which requires the introduction of highly efficient energy storage systems (ESS). Particular attention is paid to gravitational energy storage systems (GESS), which are based on the conversion of electrical energy into potential energy by lifting massive loads and then restoring it during descent. Such systems are characterized by high reliability, long service life, low operating costs, and environmental safety, which makes them promising for balancing the operating modes of electrical networks with a large share of RES. The technical, economic, and algorithmic problems of integrating GES into the structure of distribution networks are analyzed. It is shown that the main limiting factor is significant mechanical inertia, which reduces the speed of the system and makes it impossible to use it for primary frequency control. At the same time, HES effectively perform the functions of secondary and tertiary control, smooth out daily load fluctuations, provide energy reserves, and reduce technological losses. The possibility of using hybrid schemes based on combining HES with electronic power compensators (STATCOM) is considered, which improves the quality of electricity and voltage stability. A conceptual formulation of the problem of optimizing the integration of HES into electrical networks is presented, taking into account technical, economic, and physical constraints. A target function for maximizing the overall return on investment is presented, which combines the criteria of the energy storage system operator and the distribution system operator. The key limitations of the model are determined: capacity, power, rate of change of energy state, permissible voltage levels, and current load. To solve the problem, it is recommended to use combined approaches, in particular, decomposition methods, heuristic algorithms, and analytical methods based on equivalent circuits.

Keywords: gravitational energy storage system, mode balancing, renewable energy sources, optimization, electrical grid, energy balance, energy efficiency

Сучасна електроенергетика перебуває на етапі глибокої трансформації, пов'язаної зі швидким зростанням частки відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Інтеграція сонячних і вітрових електростанцій, які характеризуються високою змінністю, спричиняє нестабільність режимів роботи енергосистем,

зростання втрат та коливання параметрів якості електроенергії. Для забезпечення стабільності мережі необхідні гнучкі системи, здатні швидко компенсувати дисбаланси між генерацією і споживанням, серед яких ключову роль відіграють системи накопичення енергії (СНЕ).

Одним із перспективних напрямів є гравітаційні системи накопичення енергії (ГСНЕ), що перетворюють електричну енергію у потенційну шляхом підйому масивних вантажів і повертають її під час контрольованого опускання. Такі системи мають суттєві переваги: тривалий термін служби (до 50 років), низькі експлуатаційні витрати, екологічність і відсутність деградації ємності. Вони є ефективним рішенням для балансування енергомереж із високою часткою ВДЕ, особливо у довгостроковому горизонті зберігання енергії. Впровадження ГСНЕ дозволить підвищити гнучкість електромереж, мінімізувати небаланси потужності, покращити якість електроенергії та забезпечити ефективну інтеграцію ВДЕ. У перспективі такі системи можуть стати ключовим елементом майбутніх розумних мереж і відігравати роль регуляторів у системах з високою часткою децентралізованої генерації.

Разом із тим інтеграція ГСНЕ в електричні мережі пов'язана з низкою проблем, які можна умовно поділити на три групи: динамічні обмеження, оптимальне розміщення і керування режимами роботи.

1. Динаміка відгуку та допоміжні послуги.

Механічна природа ГСНЕ зумовлює більшу інерційність порівняно з електрохімічними накопичувачами, що ускладнює їхнє використання для швидких сервісів первинного регулювання частоти. Водночас вони ефективні для згладжування добових графіків навантаження, зсуву споживання (time-shifting), надання резерву потужності та зменшення пікових навантажень.

2. Оптимальне розміщення.

Ефективність проекту ГСНЕ значною мірою визначається вибором місця розташування і параметрів потужності та ємності. Об'єкти такого типу можуть потребувати значних площ або спеціальних умов (наприклад, занедбаних шахт чи високих конструкцій). Це обумовлює необхідність багатокритеріального техніко-економічного обґрунтування, яке враховує вплив на втрати потужності, режим напруги, завантаження ліній, а також ринкову дохідність інвестицій. Неоптимальне розміщення може призвести до підвищення витрат ОСР і зниження прибутковості проекту.

3. Моделювання та керування режимами роботи.

Особливістю ГСНЕ є потреба враховувати як електричні, так і механічні параметри. Енергетичний стан системи описується рівнянням, що пов'язує заряд/розряд, ККД механічної та електротехнічної частин і часовий інтервал роботи. Модель управління повинна узгоджувати графік роботи ГСНЕ з коливаннями генерації ВДЕ, дотримуючись при цьому обмежень по напрузі, струмах і швидкості руху вантажів. Такі моделі вимагають комплексного підходу на основі методів нелінійної оптимізації.

У роботі сформульовано концептуальну постановку задачі оптимізації інтеграції ГСНЕ у розподільні електричні мережі. Цільова функція полягає у максимізації рентабельності з урахуванням прибутку оператора, зниження технологічних втрат і капітальних витрат на будівництво та обслуговування системи. Оптимізаційна модель включає технічні обмеження по напрузі, струмах, потужності, ємності накопичувача та швидкості зміни енергетичного стану. Для розв'язання задачі доцільно застосовувати комбіновані методи –декомпозицію, евристичні алгоритми, аналітичні підходи на основі еквівалентних схем.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [7] T. Kurbatova, R. Sidortsov, G. Trypolska, D. Hulak та I. Sotnyk, "Maintaining Ukraine's grid reliability under rapid growth of renewable electricity share: challenges in the pre-war, war-time, and post-war periods", *Int. J. Sustain. Energy Planning Manage.*, т. 40, с. 41–54, квіт. 2024. Дата звернення: 11 жовт. 2025. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.54337/ijsepm.8112>
- [8] Kuzior, A. Lobanova та L. Kalashnikova, "Green Energy in Ukraine: State, Public Demands, and Trends", *Energies*, т. 14, № 22, с. 7745, листоп. 2021. Дата звернення: 11 жовт. 2025. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.3390/en14227745>
- [9] Hrytsiuk, V. Volynets, Y. Hrytsiuk, I. Bandura та N. Komenda, "Prospects for the integration of distributed energy sources into the Ukrainian power grid", *Mach. & Energ.*, т. 16, № 1, с. 130–145, 2025. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.31548/machinery/1.2025.130>
- [10] X. Luo, J. Wang, M. Dooner та J. Clarke, "Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation", *Appl. Energy*, т. 137, с. 511–536, січ. 2015. Дата звернення: 11 жовт. 2025. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.081>
- [11] F. Díaz-González, A. Sumper, O. Gomis-Bellmunt та R. Villafafila-Robles, "A review of energy storage technologies for wind power applications", *Renewable Sustain. Energy Rev.*, т. 16, № 4, с. 2154–2171, трав. 2012. Дата звернення: 11 жовт. 2025. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.029>
- [12] G. De Carne *ma in.*, "The role of energy storage systems for a secure energy supply: A comprehensive review of system needs and technology solutions", *Electric Power Syst. Res.*, т. 236, с. 110963, листоп. 2024. Дата звернення: 11 жовт. 2025. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.110963>
- [13] W. Tong, Z. Lu, M. Han, J. Sun та G. Zhao, "Solid Gravity Energy Storage A review", *J. Energy Storage*, т. 53, 2022. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105226>

- [14] F.-F. Li, J.-Z. Xie, Y.-F. Fan та J. Qiu, “Potential of different forms of gravity energy storage”, *Sustain. Energy Technol. Assessments*, т. 64, с. 103728, квіт. 2024. Дата звернення: 11 жовт. 2025. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.103728>
- [15] C. Lv, J. He, J. Ma, Y. Yang, F. Liu та W. Huang, “Capacity optimization strategy for gravity energy storage stations considering the impact of new power systems”, *PLOS ONE*, т. 20, № 4, квіт. 2025, ст. № e0320734. Дата звернення: 11 жовт. 2025. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0320734>
- [16] R. Wang, L. Zhang, C. Shi та C. Zhao, “A Review of Gravity Energy Storage”, *Energies*, т. 18, № 7, с. 1812, квіт. 2025. Дата звернення: 11 жовт. 2025. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.3390/en18071812>
- [17] M. E. A. Elsayed, S. Abdo, A. A. A. Attia, E.-A. Attia та M. A. Abd Elrahman, “Parametric optimisation for the design of gravity energy storage system using Taguchi method”, *Scientific Rep.*, т. 12, № 1, листоп. 2022. Дата звернення: 11 жовт. 2025. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-20514-y>
- [18] J. D. Hunt *та ін.*, “Underground Gravity Energy Storage: A Solution for Long-Term Energy Storage”, *Energies*, т. 16, № 2, с. 825, січ. 2023. Дата звернення: 11 жовт. 2025. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.3390/en16020825>
- [19] T. Hoshino, S. Basu, T. Ogawa, K. N. Ishihara, K. Hoshino та H. Okumura, “Geospatial Optimization of Location-Dependent Costs for Gravity Energy Storage Plants in a Mountainous Suburban Area: The Case of Fukuoka City, Japan”, *Energy Technol. Environ.*, т. 2, № 1, с. 37–48, берез. 2024. Дата звернення: 11 жовт. 2025. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.58567/ete02010004>
- [20] W. Tong *та ін.*, “Inertial characteristics of gravity energy storage systems”, у *2023 IEEE PES 15th Asia-Pacific Power Energy Eng. Conf. (APPEEC)*, Chiang Mai, Thailand, 6–9 груд. 2023. IEEE, 2023. Дата звернення: 17 жовт. 2025. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.1109/appeec57400.2023.10561970>
- [21] Y. Mi *та ін.*, “The frequency-voltage stability control for isolated wind-diesel hybrid power system”, *Electric Power Syst. Res.*, т. 192, с. 106984, берез. 2021. Дата звернення: 17 жовт. 2025. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106984>
- [22] E. Rashedi, H. Nezamabadi-pour та S. Saryazdi, “GSA: A Gravitational Search Algorithm”, *Inf. Sci.*, т. 179, № 13, с. 2232–2248, черв. 2009. Дата звернення: 17 жовт. 2025. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.1016/j.ins.2009.03.004>
- [23] B. Wang, X. Wang, Z. Zhu та X. Wu, “Siting and sizing of energy storage for renewable generation utilization with multi-stage dispatch under uncertainty: A tri-level model and decomposition approach”, *Appl. Energy*, т. 344, с. 121286, серп. 2023. Дата звернення: 11 жовт. 2025. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121286>
- [24] S. Sundeep, L. Sethuraman, D. Latha, L. J. Fingersh, Z. Wenrick та A. Munoz, “Optimizing Grid Regulation With Gravity Storage Systems: A Comparative Analysis With Different Motor Inertias”, у *2024 IEEE Energy Convers. Congr. Expo. (ECCE)*, Phoenix, AZ, USA, 20–24 жовт. 2024. IEEE, 2024, с. 323–330. Дата звернення: 11 жовт. 2025. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.1109/ecce55643.2024.10860891>
- [25] Hadaeghi та A. A. Chirani, “Optimizing Power Losses and Voltage Profiles through Simultaneous Distribution Network Reconfiguration and DG Placement Using a Hybrid CDOA-PSO Algorithm”, *Int. J. Scientific Res. Sci., Eng. Technol.*, т. 12, № 2, с. 460–476, берез. 2025. Дата звернення: 11 жовт. 2025. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.32628/ijrsrset25122157>
- [26] D. H. Huanca, L. A. Gallego та J. M. López-Lezama, “Transmission Network Expansion Planning Considering Optimal Allocation of Series Capacitive Compensation and Active Power Losses”, *Appl. Sci.*, т. 12, № 1, с. 388, груд. 2021. Дата звернення: 11 жовт. 2025. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.3390/app12010388>
- [27] Z. Lin *та ін.*, “Gravitational search algorithm optimization algorithm for grid distributed energy storage resource pool regulation matching load peak–valley and operation constraints”, *Discov. Things*, т. 5, № 1, лип. 2025. Дата звернення: 11 жовт. 2025. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.1007/s43926-025-00172-y>

Кацадзе Теймураз Луарсабович — канд. техн. наук, завідувач кафедри електричних мереж та систем КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, e-mail: teymuraz@ukr.net

Щербина Дмитро Володимирович — аспірант, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, e-mail: djdimas75@gmail.com

Katsadze Teimuraz — Cand. Sc. (Eng), Head of the Department of Electrical Networks and Systems, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, e-mail: teymuraz@ukr.net

Shcherbina Dmitry — postgraduate student, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, e-mail: djdimas75@gmail.com

В. В. Чижевський⁽¹⁾
Н. І. Франчук⁽²⁾
Є. О. Троценко⁽¹⁾
А. Б. Нестерко⁽¹⁾

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ТРАНСФОРМАТОРІВ З РПН ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ КЕРОВАНИХ УСТАНОВОК КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

⁽¹⁾Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

⁽²⁾ПрАТ "ДТЕК Київські електромережі"

Трансформатори з пристроями регулювання напруги під навантаженням (РПН) є ключовими елементами електричних мереж, які об'єднують на паралельну роботу мережі різних класів номінальної напруги, забезпечують підтримання у допустимих межах напруги в мережах операторів систем розподілу (ОСР) за зміни рівнів напруги в магістральній мережі та рівнів споживання в мережі ОСР. Водночас, наявність пристроїв РПН в конструкції трансформаторів зумовлює ряд експлуатаційних проблем, основними з яких є:

- зниження показників надійності системи трансформатора з РПН у порівнянні з показниками надійності трансформатора без РПН;
- обмеженість механічного та електричного ресурсу комутаційної системи РПН, що призводить до необхідності обмеження кількості перемикачів її відгалужень, періодичного тривалого і дороговартісного обслуговування;
- виникнення короткочасних електричних перевантажень та перенапруг в контактній системі РПН;
- збільшення втрат активної потужності та енергії в системі трансформатора з РПН у разі задіяння регульовальних можливостей РПН;
- дискретність та обмежена швидкість перемикачів відгалужень під час регулювання напруги.

В значній мірі зазначені проблеми можуть бути вирішені шляхом застосування засобів регулювання реактивної потужності різних типів – як керованих установок компенсації реактивної потужності (УКРП) з механічною комутацією груп конденсаторів, так і установок, які відносять до групи засобів гнучких систем передачі змінного струму (FACTS) з керуванням за допомогою силової електроніки (статичних компенсаторів реактивної потужності (SVC), статичних синхронних компенсаторів (STATCOM) тощо). На сьогодні в електричних мережах Об'єднаної електроенергетичної системи (ОЕС) України кількість установок регулювання реактивної потужності, які відносять до засобів FACTS, є вельми невеликою. Тому у роботі основну увагу приділено питанню оптимізації режиму роботи системи трансформатора з РПН із застосуванням більш розповсюджених в ОЕС України керованих УКРП з механічною комутацією груп конденсаторів.

Розглянута в роботі оптимізаційна задача передбачає мінімізацію втрат активної потужності в РПН трансформатора із залученням керованої УКРП на шинах низької напруги трансформатора для забезпечення на них необхідного рівня напруги.

В роботі визначено області доцільності застосування керованих УКРП та їх необхідну робочу потужність за умови різних рівнів напруги на шинах високої напруги трансформаторів, різного ступеня завантаження та коефіцієнта потужності навантаження на шинах НН, встановлено відмінність областей доцільності застосування УКРП для трансформаторів підстанцій ОСР та трансформаторів абонентських підстанцій. На прикладі підстанції 110/10 кВ показано зменшення втрат активної потужності в РПН трансформатора шляхом підтримання номеру регульовального відгалуження максимально близько нейтрального положення в процесі регулювання напруги на шинах НН за допомогою використання керованої УКРП в різних навантажувальних режимах.

Запропонований у роботі підхід може бути ефективно застосований, насамперед, в мережах операторів систем розподілу, поєднуючи позитивний ефект зменшення втрат активної потужності в системі трансформаторів з РПН та зниження кількості перемикачів відгалужень РПН із загальним зменшенням перетоків реактивної потужності по лініях електропередачі, що додатково підвищить загальну ефективність експлуатації цих мереж.

РЕПРЕЗЕНТАЦІЯ МЕТОДУ ВУЗЛОВИХ НАПРУГ НА ОСНОВІ
МЕТОДОЛОГІЇ РІВНОВАЖНОГО БАЛАНСУВАННЯ

Житомирський військовий інститут ім. С.П. Корольова

Анотація

Отримав подальший розвиток метод вузлових напруг на основі використання методології рівноважного балансування, що дозволило збільшити ефективність розрахунку усталеного режиму електричної мережі в умовах небалансу генерованої і спожитої потужностей.

Ключові слова: електрична мережа, усталений режим, метод вузлових напруг, методологія рівноважного балансування.

Abstract

The nodal voltage method using the equilibrium balancing methodology has been further developed, which has allowed increasing the efficiency of calculating the steady-state mode of the electrical network in conditions of imbalance of generated and consumed capacities.

Keywords: electrical network, steady state, nodal voltage method, equilibrium balancing methodology.

З метою підвищення ефективності розрахунку усталеного режиму електричної мережі в умовах небалансу потужностей виникає необхідність подальшого розвитку традиційних моделей. Використання класичного методу вузлових напруг за умови різних балансуючих вузлів електричної мережі призводить до похибок розрахунку струмів у вітках при наявності небалансу потужностей. Для удосконалення методу вузлових напруг використовуємо методологію рівноважного балансування [1]. З цією метою повну першу матрицю інцидентності доповнюємо стовпчиком з одиниць, не вилучаючи рядок балансуючого вузла, на відміну від класичного методу вузлових напруг: $MP = \{M; 1\}$. Це дозволяє в усі рівняння першого закону Кірхгофа системи рівнянь додати додаткову змінну рівноважного задаючого струму.

Діагональна матриця опорів доповнюється рядком і стовпчиком, на діагоналі якого міститься одиниця. Таким чином, формується діагональна матриця вектору опорів, доповненого одиницею. Тобто результуюча матриця матиме вигляд:

$$ZP = \text{diag}(\{Z; 1\}) = \text{diag} \begin{pmatrix} Z_1 \\ \dots \\ Z_m \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Розширена матриця провідностей вузлів визначається аналогічно до методу вузлових напруг із використанням розширених матриць:

$$YP = MP \cdot ZP^{-1} \cdot MP^T.$$

Вектор спадів напруг, у свою чергу, визначається з добутку оберненої розширеної матриці вузлових провідностей і вектору вузлових струмів:

$$DU = YP^{-1} \cdot JP.$$

Значення вектора струмів у вітках обчислюються з добутку:

$$IP = ZP^{-1} \cdot MP^T \cdot DU.$$

Введення в розрахункову модель методу вузлових напруг додаткових одиничних коефіцієнтів дозволяє розширити межі його використання, дещо збільшуючи при цьому складність обчислень, проте отримуючи більш точне значення струмів у вітках за умови небалансу потужностей генерації і споживання. У результаті такого розрахунку отримані значення струмів у вітках становлять середні значення, які класичним методом вузлових напруг будуть визначені шляхом розрахунку усіх варіантів з різними балансуючими вузлами електричної мережі. Таким чином, запропонована методика підвищує ефективність розрахунку усередненого значення струму.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] Бевз С.В., Бурбело С.М., Войтко В.В. Метод рівноважного балансування та автоматизація розрахунків усталеного режиму електричної мережі засобами MathCAD // Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова. – 2020. – № 4. – С. 36–44.

Бевз Світлана Володимирівна – кандидат технічних наук, доцент, викладач кафедри електротехніки та електроніки, Житомирський військовий інститут імені С.П. Корольова, м. Житомир, e-mail: svitlanavolodymyrivnabevz@gmail.com.

Бурбело Сергій Михайлович – кандидат технічних наук, викладач кафедри електротехніки та електроніки, Житомирський військовий інститут імені С.П. Корольова, м. Житомир, e-mail: smburbelo@gmail.com

Svitlana Bevz – Ph.D., Associate Professor, Lecturer of the Department of Electrical Engineering and Electronics, Zhytomyr Military Institute named after S.P. Korolev, Zhytomyr, e-mail: svitlanavolodymyrivnabevz@gmail.com.

Serhii Burbelo – Ph.D., Lecturer of the Department of Electrical Engineering and Electronics, Zhytomyr Military Institute named after S.P. Korolev, Zhytomyr, e-mail: smburbelo@gmail.com.

КОМПЛЕКСНА МОДЕЛЬ ПРОГНОЗУВАННЯ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ МАСЛЯНИХ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ З УРАХУВАННЯМ СИНЕРГЕТИЧНИХ ФАКТОРІВ СТАРІННЯ

¹НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Анотація

Запропоновано математичну модель прогнозування залишкового ресурсу силових трансформаторів на основі модифікованої функції Вейбулла-Арреніуса з врахуванням мультиплікативного впливу факторів на-вколишнього середовища та синергетичні ефекти між різними типами дефектів.

Ключові слова: силові трансформатори, прогнозування ресурсу, інтенсивність відмов, синергетичні ефекти, модель Вейбулла-Арреніуса.

Abstract

The purpose of the work is to create a comprehensive mathematical model for predicting the residual resource of technical systems based on the modified Weibull-Arrhenius function, taking into account the multiplicative influence of environmental factors and synergistic effects between different types of defects.

Keywords: power transformers, resource forecasting, failure rate, synergistic effects, Weibull-Arrhenius model.

Вступ

Масляні силові трансформатори є критичними елементами електроенергетичних систем, відмова яких може призвести до значних економічних збитків та порушення електропостачання споживачів. За статистичними даними, близько 60% парку трансформаторів в Україні експлуатується понад 25 років, що актуалізує завдання достовірного прогнозування їх залишкового ресурсу для оптимізації стратегій технічного обслуговування та ремонтів. Метою даного дослідження була розробка та валідація математичної моделі оцінки технічного стану та прогнозування залишкового ресурсу масляних трансформаторів на основі комплексного врахування експлуатаційних факторів, дефектів основних вузлів та умов навколишнього середовища. У даній роботі представлено комплексну математичну модель на основі модифікованої функції Вейбулла-Арреніуса, яка враховує мультиплікативний вплив п'яти критичних типів дефектів, факторів довкілля та їх взаємну синергію. Модель апробовано на статистичних даних 10 масляних трансформаторів потужністю 40-630 кВА з погодинним моніторингом експлуатаційних параметрів протягом 10-річного періоду (2014-2024 рр.).

Результати досліджень

Розроблена модель базується на модифікованій функції Вейбулла-Арреніуса з урахуванням мультиплікативного впливу факторів середовища:

$\lambda_{total}(t) = \lambda_{base}(t, T) \cdot \prod AF_i \cdot K_{synergy} + \sum \lambda_{defect,j}(t)$, де базова інтенсивність відмов λ_{base} залежить від температури найбільш нагрітої точки, AF_i - фактори прискорення від вологості, вібрацій, UV-випромінювання та забруднення, $K_{synergy}$ - коефіцієнт синергії дефектів.

В результаті статистичної обробки експлуатаційних даних ідентифіковано п'ять критичних типів дефектів для досліджуваної вибірки трансформаторів: термічне старіння ізоляції (35% загального впливу на інтенсивність відмов), несправності РПН (22%), деградація введів (18%), порушення роботи системи охолодження (15%) та окислення трансформаторного масла (10%). Встановлено кількісні залежності інтенсивності відмов від факторів середовища: підвищення вологості на 20% збільшує $\lambda(t)$ в 1.4-1.8 рази, перепади температур понад 15°C прискорюють старіння на 25-30%, а забруднення повітря класу 3-4 за ІЕС 60815 підвищує ризик відмови введів на 40%. Особливо важливим результатом є виявлення синергетичних ефектів між дефектами - одночасна наявність трьох і більше дефектів збільшує інтенсивність відмов в 1.5 рази, при цьому найсильніша синергія спостерігається між деградацією масла та старінням ізоляції з коефіцієнтом синергії $K_{synergy} = 2.0$.

Статистична валідація моделі на реальних даних експлуатації показала середню абсолютну похибку прогнозування МТТФ на рівні 12.3%, коефіцієнт детермінації $R^2 = 0.87$ та точність визначення стану трансформатора 91%. Для досліджуваної вибірки трансформаторів отримано середній прогнозований МТТФ 28.5 років з діапазоном від 22 до 35 років залежно від умов експлуатації та технічного стану. На

момент обстеження три трансформатори потребують негайного виведення в ремонт при функції надійності $R(t) < 0.5$, чотири знаходяться в задовільному стані з $0.5 < R(t) < 0.8$, і три трансформатори перебувають в доброму стані з $R(t) > 0.8$. Економічний ефект від впровадження моделі для парку з 10 трансформаторів оцінюється в 1.6 млн грн на рік за рахунок оптимізації ремонтних кампаній та попередження аварійних відмов.

Висновки

Розроблена комплексна модель дозволяє з високою точністю прогнозувати залишковий ресурс масляних трансформаторів з урахуванням реальних умов експлуатації. Врахування синергетичних ефектів між дефектами підвищує точність прогнозування на 15-20% порівняно з традиційними моделями, що базуються лише на температурному старінні. Модель може бути інтегрована в системи онлайн-моніторингу для автоматизованої оцінки технічного стану трансформаторного парку та прийняття обґрунтованих рішень щодо стратегії технічно-го обслуговування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Бардик Є. І., Болотний М. П., і Бондаренко О. Л. Визначення ризику порушення нормального режиму енергосистеми при плановому і аварійному виведенні з експлуатації електрообладнання. *Вісник ВПІ*. 2021. № 2. С. 54–62.
- [2] Костерев М. В., Бардик Є. І. Питання побудови нечітких моделей оцінки технічного стану об'єктів електричних систем. Київ : НТУУ «КПІ», 2010. 131 с.
- [3] Saha T.K. Review of modern diagnostic techniques for assessing insulation condition in aged transformers. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2018, 10(5), pp. 903-917.
- [4] Soleimani M., Kezunovic M., Butenko S. Linear Arrhenius-Weibull Model for Power Transformer Thermal Stress Assessment. *IEEE Access*. 2022. Vol. 10. P. 19013–19025.
- [5] Huang W., et al. Modeling the Aging-dependent Reliability of Transformers Considering the Individualized Aging Threshold and Lifetime. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2022. Vol. 37, № 6. P. 4631–4640.
- [6] Rubanenko O., Bajaj M., Rubanenko O., Hryshchuk M. Determination of Technical Condition of the Power Transformer by Frequency Response Analysis Method. *IEEE UKRCON-2021*. 2021. P. 395–400.
- [7] Іванков В. Ф., Басова А. В., Хімюк І. В. Теплова стійкість трансформатора до дії геомагнітних струмів. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2020. № 55. С. 14–18.
- [8] Bardyk Ye. I. Determination of "weak" by power transformers reliability of power systems according to the results of failure risk assessment under external short circuits. *Bulletin of National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute" Series – Radio Engineering. Radio Apparatus Building*. 2021. № 86. С. 56–63.

Бардик Євген Іванович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри відновлювальних джерел енергії, КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, e-mail: bardik1953@gmail.com

Коваль Ярослав Сергійович – аспірант кафедри відновлювальних джерел енергії, КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, e-mail: yaroslavkoval24@gmail.com

Bardyk Yevhen Ivanovych – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Renewable Energy Sources, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, e-mail: bardik1953@gmail.com

Koval Yaroslav Serhiyovych – Postgraduate Student of the Department of Renewable Energy Sources, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, e-mail: yaroslavkoval24@gmail.com

СЕГМЕНТАЦІЯ ПАРКУ ОБЛАДНАННЯ МЕТОДАМИ КЛАСТЕРНОГО АНАЛІЗУ

¹НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Анотація

Запропоновано метод сегментації парку силового обладнання і повітряних ліній енергосистеми, який забезпечує виявлення одиниць обладнання, які мають найбільший ризик відмови на основі використання алгоритмів кластеризації.

Ключові слова: *ризик, комутаційне обладнання, сегментація, парк обладнання, кластер, кластерний аналіз, повітряні лінії.*

Abstract

A method for segmenting power equipment and power system overhead lines is proposed, which identifies equipment units with the highest risk of failure based on the use of clustering algorithms

Keywords: *risk, switching equipment, segmentation, equipment fleet, cluster, cluster analysis, overhead lines.*

Вступ

Існує об'єктивна неможливість одночасного фінансування ремонтно-експлуатаційних витрат для всієї сукупності об'єктів енергосистеми. У зв'язку з цим виникає необхідність сегментації наявного парку електрообладнання і повітряних ліній енергокомпаній, яка може проводитись в декілька етапів.

Результати досліджень

Для визначення груп електрообладнання і повітряних ліній (ПЛ) з підвищеним ризиком експлуатації, використовуючи алгоритми кластеризації було розглянемо схему підсистеми енергосистеми (ЕЕС) енергокомпанії, яка містить такі типи обладнання: синхронні генератори, силові трансформатори, повітряні лінії високовольтні вимикачі. Було визначено ознаки за якими будуть оцінюватись об'єкти у вибірці. При цьому сформовано перелік ознак за якими необхідно виконати групування наявного парку електрообладнання для розподілу інвестиційних витрат на обслуговування і заміну обладнання. В якості таких ознак доцільно взяти наступні показники, використовувались для оптимального розподілу витрат на ТО і Р: імовірність відмови на інтервалі часу спостереження, ризик порушення нормального режиму при відмові об'єкта, залишкова вартість основних фондів, пропуск електроенергії за якими визначається інтегральний показник для виділення коштів А.

Між тим для прийняття оперативних рішень щодо планового і позапланового виведення з експлуатації електрообладнання і ПЛ було визначено перелік ознак за якими необхідно виконати групування як в межах певного типу обладнання так і всього наявного парку електрообладнання і ПЛ. До таких оперативно значущих ознак відносяться - в першу чергу імовірність відмови обладнання на інтервалі часу спостереження та ризик порушення нормального режиму підсистеми ЕЕС у разі відмови чи планового або позапланового виведення з експлуатації електрообладнання і ПЛ.

Для трьох вікових діапазонів (0-25; 25-50; 50-75) було виконано сегментацію парку електрообладнання і ПЛ кластеризацією методом к-середніх в частині потреби першочергового виділення коштів на ТО і Р та заміну обладнання за величиною показника А, а також прийняті оперативні рішення щодо планового і позапланового виведення з експлуатації електрообладнання і ПЛ за імовірністю відмови обладнання на інтервалі часу спостереження та рівнем ризику виникнення аварійної ситуації в підсистемі ЕЕС у разі відмови чи виведення з експлуатації електрообладнання і ПЛ.

Висновки

Реалізація запропонованого підходу забезпечує формування обґрунтованої послідовності ремонтів або заміни елементів парку обладнання, що дозволяє знизити ризик порушення нормального режиму роботи ЕЕС. Отримані результати мають практичну важливість для енергогенерувальних та енергозбутових компаній, оскільки дозволяють приймати превентивні рішення, які спрямовані на

підвищення стійкості ЕЕС та більш доцільного розподілу коштів енергокомпаній.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] Eltyshhev, D. K. (2021b). Electric equipment operation scenarios based on the results of non-destructive condition control. Journal of Physics Conference Series, 1886(1), 012010. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1886/1/012010>.

[2] Ciapessoni, E., Cirio, D., Massucco, S., & Pitto, A. (2011). A Probabilistic Risk Assessment and Control methodology for HVAC electrical grids connected to multiterminal HVDC networks. IFAC Proceedings Volumes, 44(1), 1727–1732. <https://doi.org/10.3182/20110828-6-it-1002.02739>

[3] Duan, C., Chen, X., Shi, H., & Liu, H. (2019). A new model for failure mode and effects analysis based on K-Means clustering within hesitant linguistic environment. IEEE Transactions on Engineering Management, 69(5), 1837–1847. <https://doi.org/10.1109/tem.2019.2937579>.

[4] Chiang, H., Xu, T., Lv, X., & Dong, N. (2022). Hierarchical Trust-Tech-Enhanced K-Means methods and their applications to power grids. IEEE Open Access Journal of Power and Energy, 9, 560–572. <https://doi.org/10.1109/oajpe.2022.3230385>.

Бардик Євген Іванович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри відновлювальних джерел енергії, КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, e-mail: bardik1953@gmail.com

Бондаренко Олександр Леонідович – доктор філософії, асистент кафедри відновлювальних джерел енергії, КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, e-mail: bonduro@gmail.com

Заклюка Ігор Вячеславович – аспірант кафедри відновлювальних джерел енергії, КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, e-mail: ihorzakliuka1@gmail.com

Bardyk Yevhen Ivanovych – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Renewable Energy Sources, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, e-mail: bardik1953@gmail.com

Bondarenko Oleksandr Leonidovych – Doctor of Philosophy, Assistant Professor of the Department of Renewable Energy Sources, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, e-mail: bonduro@gmail.com

Zaklyuka Igor Vyacheslavovych – Postgraduate Student of the Department of Renewable Energy Sources, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, e-mail: ihorzakliuka1@gmail.com

МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ РЕГУЛЮВАННЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ІНВЕРТОРІВ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ

Національний університет «Львівська політехніка»

Анотація

У статті досліджено впровадження фотоелектричної станції в розподільчу електричну мережу середньої напруги. Проведено аналіз впливу змін генерованої потужності фотоелектричної станції на рівні напруги в мережі. Досліджено основні режими регулювання реактивної потужності інверторами фотоелектричної станції. Проаналізовано характер змін напруги в мережі залежно від способу регулювання реактивної потужності інверторів фотоелектричної станції. Показано умови регулювання реактивної потужності в режимі підтримки напруги в точці спільного приєднання.

Ключові слова: фотоелектрична станція, регулювання реактивної потужності, зміни напруги в електричній мережі.

Abstract

The paper provides study results on photovoltaic power plant integration into medium voltage distribution grid. The report provides analysis of PV generated power fluctuations impact on voltage levels in the point of common coupling. Common reactive power control modes of PV power plants inverters were studied. Voltage profile variations have been examined with respect to the reactive power compensation modes of photovoltaic installation inverters. The operating conditions were established for reactive power control in voltage support mode.

Keywords: photovoltaic power plant, reactive power control, voltage variations in electrical network.

Вступ

Широке впровадження засобів розподіленого генерування, зокрема, відновлюваних джерел потужності створює нові виклики для операторів електричних мереж з огляду на характер вихідної потужності вітрогенераторів та фотоелектричних систем. Збільшення частки відновлюваних джерел в електричних мережах посилює вплив флуктуаційного характеру генерованої потужності на координати режимів мережі, надійність роботи релейного захисту, якість електричної енергії та стійкість електропересилання. Внаслідок проходження густих хмар зміни потужності фотоелектричної станції можуть спричинити значні відхилення напруги та зміни перетоків потужності в мережі за короткий інтервал часу, особливо без використання систем накопичення енергії[1]. Сучасні інвертори фотоелектричних станцій оснащені можливостями регулювати реактивну потужність[2], що має позитивний вплив на рівні напруги, однак для ефективного використання цих можливостей необхідне детальне моделювання режимів регулювання з урахуванням специфіки конкретної мережі та умов експлуатації фотоелектричних станцій.

Метою роботи є дослідження впливу різних режимів регулювання реактивної потужності інверторів фотоелектричних станцій на параметри режимів роботи електричних мереж з високою часткою відновлюваних джерел. Для моделювання використана програмна бібліотека PandaPower[3]. Розроблена комп'ютерна модель дозволяє дослідити основні режими регулювання реактивної потужності сучасних інверторів ФЕС та їх ефективність з огляду на рівні напруги, характер змін напруги та втрати потужності в електричній мережі. Модель спрямована на оцінку впливу змін активної потужності генерованої сонячною електростанцією на параметри мережі за різних способів регулювання реактивної потужності. Результати моделювання можуть бути корисними як для операторів розподільчих мереж, які планують інтегрувати ФЕС у відповідальні ділянки, так і для експлуатантів ФЕС, що мають на меті забезпечення ефективної роботи обладнання при дотриманні вимог до якості електричної енергії.

Результати дослідження

Проведений аналіз режимів регулювання реактивної потужності в пункті приєднання електростанції показує вплив на режими електричної мережі та споживачів. На рис. 1 показано зміни активної потужності фотоелектричної станції, отримані в результаті моделювання швидких змін погодних умов (проходження хмарного покриву) для вибраної місцевості її встановлення. Залежно від способу регулювання реактивної потужності фотоелектричної станції та кута повного опору системи в пункті спільного приєднання (ПСП) спостерігається різний характер відхилення напруги.

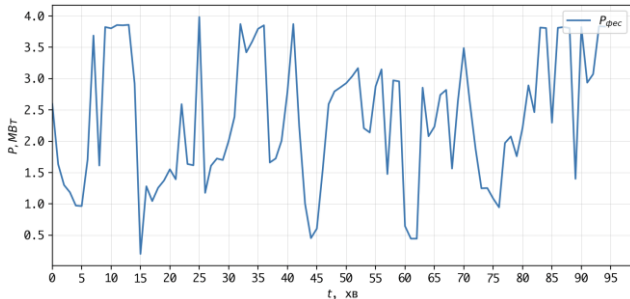


Рис. 1. Активна потужність фотоелектричної станції за інтервал часу під час проходження сильних хмар

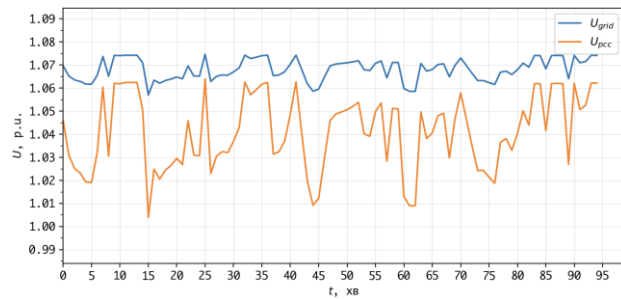


Рис. 2. Рівні напруги в ПСП та на початку ЛЕП без регулювання реактивної потужності ($\cos\varphi_{inv} = 1$)

На рис. 2 показано зміни напруги у ПСП, якщо ФЕС генерує в мережу тільки активну потужність ($\cos\varphi = 1$). Для порівняння на рис. 3 показано часову функцію змін напруги, коли ФЕС генерує в мережу і реактивну потужність, яка залежить від величини активної потужності гібридної станції ($P_{фес}$) і визначається згідно з виразом:

$$Q_{фес} = P_{фес} \cdot tg\varphi \quad (1)$$

де $tg\varphi$ коефіцієнт реактивної потужності взятий для порівняльних розрахунків (відповідає специфікації інвертора ФЕС). На рис. 4 наведено характер змін напруги у разі споживання реактивної потужності ФЕС з тим же коефіцієнтом реактивної потужності.

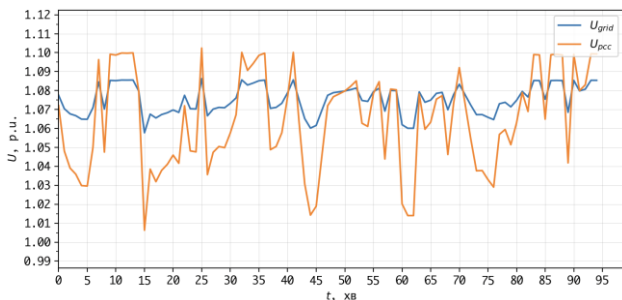


Рис. 3. Рівні напруги в ПСП та на початку ЛЕП за регулювання потужності при коефіцієнті потужності $\cos\varphi_{inv} = -0.95$ (ємнісний)

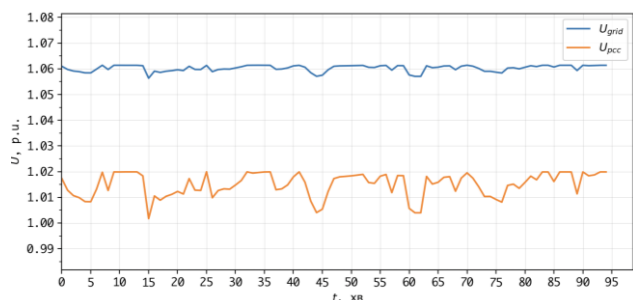


Рис. 4. Рівні напруги в ПСП та на початку ЛЕП за регулювання реактивної потужності при коефіцієнті потужності $\cos\varphi_{inv} = 0.95$ (індуктивний)

Проаналізувавши залежності (рис. 2, рис. 3, рис 4) встановлено та показано особливість роботи ФЕС з сталим кутом реактивної потужності інвертора – зменшення рівня генерованої реактивної потужності в мережу призводить до зменшення відхилень напруги у приєднаній електричній мережі. Проте, такий режим регулювання не забезпечує адаптивного реагування на зміни параметрів мережі та не дозволяє використовувати інвертори для підтримки напруги в заданих межах, що обмежує його застосування в мережах з високою часткою розподіленої генерації.

Досліджено режим підтримки заданого значення напруги. Такий режим компенсації реактивної потужності є технічно складнішим за розглянуті вище. Для моделювання режиму const U використано інтегрально-пропорційний регулятор здатний швидко реагувати на відхилення напруги у вузлі приєднання. Регулювання обмежене зоною нечутливості регулятора ($U_{ref} = U_{ref0} \pm \varepsilon$) та максимальним та мінімальним значеннями реактивної потужності ($Q_{min} \leq Q_{фес_t} \leq Q_{max}$) встановленої виробником, або експлуатаційною компанією:

$$\Delta Q = K_p(U_{ref} - U_t) + K_i \int_0^t (U_{ref} - U_t) dt \quad (2)$$

де K_p – пропорційний коефіцієнт, K_i – інтегральний коефіцієнт, U_{ref} – бажане значення напруги, U_t – миттєве значення напруги. На рис. 5 наведені рівні напруг за режиму регулювання реактивної потужності для підтримки напруги. На рис. 6 наведені значення реактивної потужності, що видавалася або споживалася інвертором для підтримки бажаного значення напруги у вузлі приєднання.

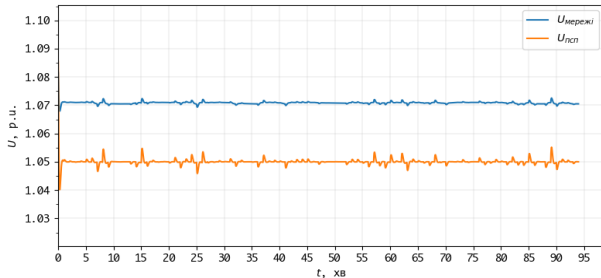


Рис. 5. Рівні напруги в ПСП та на початку ЛЕП за регулювання реактивної потужності в режимі підтримки напруги ($U_{ref} = 1.05$)

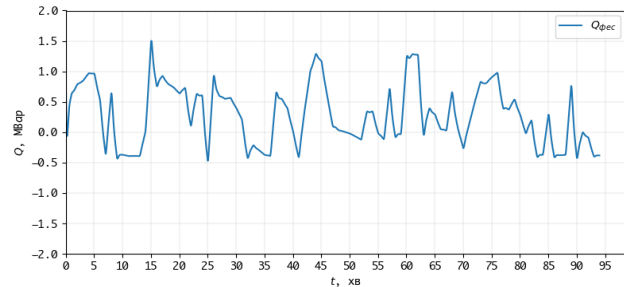


Рис. 6. Реактивна потужність ФЕС за регулювання реактивної потужності в режимі підтримки напруги ($U_{ref} = 1.05$)

Висновки

У роботі було проведено моделювання режимів роботи фотоелектричної станції, що підключена в кінці лінії електропередавання напругою 35 кВ. Проаналізовано вплив змін активної потужності ФЕС, зумовлених змінами сонячної інсоляції на рівень і характер зміни напруги в мережі. Досліджено типові режими регулювання реактивної потужності інверторів – режим підтримки сталого коефіцієнта потужності, режим підтримки напруги.

Дослідження показало, що зміни генерованої потужності ФЕС спричиняють суттєві відхилення напруги в точці спільного приєднання, що негативно впливає на якість електроенергії для споживачів. Встановлено, що рівень відхилень напруги безпосередньо залежить як від величини зміни сонячного опромінення так і властивостей лінії електропередавання. Показано, що для мінімізації впливу таких відхилень доцільно застосовувати різні режими регулювання реактивної потужності інверторним обладнанням станції.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. F. C. L. Trindade, T. S. D. Ferreira, M. G. Lopes and W. Freitas, "Mitigation of Fast Voltage Variations During Cloud Transients in Distribution Systems With PV Solar Farms," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 32, no. 2, pp. 921-932, April 2017, doi: 10.1109/TPWRD.2016.2562922.
2. F. M. Aboshady, I. Pisica, A. F. Zobaa, G. A. Taylor, O. Ceylan and A. Ozdemir, "Reactive Power Control of PV Inverters in Active Distribution Grids With High PV Penetration," in IEEE Access, vol. 11, pp. 81477-81496, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3299351.
3. L. Thurner, A. Scheidler, F. Schäfer et al, pandapower - an Open Source Python Tool for Convenient Modeling, Analysis and Optimization of Electric Power Systems, IEEE Transactions on Power Systems, DOI:10.1109/TPWRS.2018.2829021, 2018.
4. Варецький Ю. О., Горбань В. М., Пазина Я. С. Зміни напруги в електричній мікромережі з гібридною електростанцією. Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Електроенергетичні і електромеханічні системи. 2016. № 840. С. 17 – 23.

Максимук Олег Ігорович — аспірант групи ЕЕа-21, кафедра енергетики та систем управління, інститут енергетики і систем керування, Національний Університет Львівська Політехніка, Львів, e-mail: oleh.i.maksymuk@lpnu.ua

Науковий керівник: **Варецький Юрій Омелянович** — д-р техн. наук, професор, кафедра енергетики та систем управління, інститут енергетики і систем керування, Національний університет «Львівська Політехніка», м. Львів

Maksymuk Oleh I. — Department of Electric Power Engineering and Control Systems, Institute of Power Engineering and Control Systems, Lviv Polytechnic National University, Lviv, email: oleh.i.maksymuk@lpnu.ua

Supervisor: **Yuriy Varetsky O.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Electric Power Engineering and Control Systems, Institute of Power Engineering and Control Systems, Lviv Polytechnic National University, Lviv

РОЗРОБКА ПРИНЦИПІВ ВИЯВЛЕННЯ ОБРИВУ ПРОВОДУ У ТРИФАЗНІЙ РОЗПО-ДІЛЬНІЙ МЕРЕЖІ

¹ Національна академія наук України Інститут електродинаміки, Київ, Україна

Анотація

За функціональним призначенням системи електропостачання напругою 6–35 кВ поділяють на міські, сільські та промислові. У містах та на промислових підприємствах такі мережі переважно виконуються у вигляді кабельних ліній (КЛ), тоді як у сільській місцевості — на основі повітряних ліній (ПЛ).

Ключові слова: розподільні мережі 6–35 кВ, комутаційна апаратура, визначення місця пошкодження, обрив проводу, однофазні замикання на землю.

Abstract

According to the functional purpose, power supply systems with a voltage of 6–35 kV are divided into urban, rural and industrial. In cities and industrial enterprises, such networks are mainly implemented in the form of cable lines (CL), while in rural areas - based on overhead lines (OL).

Keywords: distribution networks 6–35 kV, switching equipment, determining the location of damage, wire breakage, single-phase ground faults.

Режим роботи СЕП 6-35 кВ характеризується несиметричністю навантаження фаз різноманітністю і нерівномірністю добового навантаження та режимом заземлення нейтралі трансформаторів.

Метою роботи розроблення техніко-економічної моделі міжсистемної лінії електропередавання для економічного обґрунтування конструкції фази.

Для запобігання аварійним режимам у лініях електропостачання напругою 6–35 кВ при обриві фазного проводу в прольоті зі сторони живлення, зокрема у випадку його падіння на землю, у роботі виконано аналіз струмів і напруг на силових трансформаторах лінії при обриві проводу на стороні високої та низької напруги. Проведені дослідження дозволили виявити найбільш інформативні ознаки обриву проводу на стороні 6–10 кВ, на основі яких сформовано концепцію системи діагностування. Відповідно до розробленої концепції створено принципову схему та побудовано експериментальний макет системи діагностування обриву проводу в розгалуженій електричній мережі напругою 6–10 кВ.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] V. Lovenčip, Z. Toroš, S. Ceferin, M. Bezjak, B. Turnšek, B. Likar, M. Dežman, "Advanced Protection of Overhead Lines in the Event of Interrupted Conductor," in Proc. of 22nd International Conference on Electricity Distribution, CIRED 2013, Stockholm, 2013, 3, 2, pp. 1405.
- [2] Кутіна М.В. Система захисту від обриву проводу та пошук місця пошкодження в розподільних мережах напругою 6-35 кВ / Технічна електродинаміка.- 2012.- № 2.-С.46-48.
- [3] Кошман В.І., Сабарно Л.Р., Севастюк І.М. Пристрій захисту розподільної електричної мережі від обриву проводу / 36.наук.праць "Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України". 2015.- № 40.- С. 44-48.
- [4] Кошман В.І., Сабарно Л.Р., Севастюк І.М. Принципи визначення обриву проводу в розподільній електричній мережі / 36. наук. праць "Вісник ХНТУСГ". Вип. 163. –Харків, 2015.

Кошман Всеволод Іванович – канд. техн. наук, науковий співробітник відділу оптимізації систем електропостачання, kuchanskiyvladislav@gmail.com;

Сабарно Людмила Ростиславівна – канд. техн. наук, старший науковий співробітник відділу оптимізації систем електропостачання, sabarno@ukr.net;

Севастюк Ігор Михайлович – молодший науковий співробітник, відділу оптимізації систем електропостачання
Koshman Vsevolod Ivanovich – Candidate of Technical Sciences, Researcher, Department of Power Supply Systems Optimization, kuchanskiyvladislav@gmail.com;

Sabarno Lyudmila Rostyslavivna – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Department of Power Supply Systems Optimization, sabarno@ukr.net;

Sevastyuk Igor Mykhailovych – Junior Researcher, Department of Power Supply Systems Optimization

АНАЛІЗ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ МОБІЛЬНИХ РОБОТОТЕХНІЧНИХ ПЛАТФОРМ І БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ У ГІБРИДНИХ МЕРЕЖАХ

Національний університет "Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка"

Анотація

У роботі проведено порівняльний аналіз енергоефективності, функціональної автономності та стабільності зв'язку мобільних робототехнічних наземних платформ (UGV) у складі гібридних телекомунікаційних систем. Основна увага приділена вивченню потенціалу UGV як основи для побудови енергооптимізованих та надійних мереж нового покоління, здатних забезпечувати безперервний обмін даними, підтримку систем енергетичного керування та інформаційний моніторинг у складних середовищах як у військовий так і мирний часи. Особливий акцент зроблено на порівнянні енергетичного балансу наземних платформ з безпілотними літальними апаратами (UAV) з метою визначення переваг наземних систем у контексті тривалості автономної роботи, стабільності сигналу та можливості використання потужних антенних модулів. Встановлено, що UGV характеризуються низьким рівнем енергетичних втрат, оскільки не потребують витрат на підтримання висоти чи стабілізацію положення в повітрі. Це дозволяє ефективніше розподіляти енергоресурси між системами руху, зв'язку та обчислювальними блоками. Завдяки стабільній базі та відсутності обмежень за масою, мобільні наземні платформи можуть інтегрувати великі антени, сонячні панелі та елементи енергозбереження, що значно підвищує їх автономність. Розглянуто застосування інтелектуальних методів адаптивного керування енергоспоживанням, які використовують алгоритми глибокого навчання. Такі методи дозволяють прогнозувати зміни навантаження, регулювати енергорозподіл між модулями та забезпечувати безперервність зв'язку навіть у разі динамічних змін топології мережі або навколишнього середовища. Показано, що саме наземні робототехнічні системи можуть виконувати роль енергетично стабільної основи гібридної мережевої інфраструктури, доповнюючи повітряні елементи та забезпечуючи їм стійке підключення в складних умовах. Такий підхід сприяє створенню збалансованих систем, у яких ключові функції керування, зв'язку й енергорозподілу реалізуються через автономні наземні модулі, здатні до самоорганізації та колективного прийняття рішень.

Ключові слова: мобільні наземні робототехнічні платформи (UGV); безпілотні літальні апарати (UAV); гібридні мережі; енергоефективність; глибоке навчання; телекомунікаційні системи.

Abstract

The paper provides a comparative analysis of the energy efficiency, functional autonomy and communication stability of mobile robotic ground platforms (UGVs) as part of hybrid telecommunications systems. The main focus is on studying the potential of UGVs as a basis for building energy-optimised and reliable next-generation networks capable of providing continuous data exchange, energy management system support and information monitoring in complex environments in both military and peacetime. Particular emphasis is placed on comparing the energy balance of ground platforms with unmanned aerial vehicles (UAVs) in order to determine the advantages of ground systems in terms of autonomous operation duration, signal stability and the possibility of using powerful antenna modules. It has been established that UGVs are characterised by low energy losses, as they do not require expenditure on maintaining altitude or stabilising their position in the air. This allows for more efficient distribution of energy resources between the movement, communication and computing systems. Thanks to their stable base and lack of weight restrictions, mobile ground platforms can integrate large antennas, solar panels, and energy-saving elements, which significantly increases their autonomy. The application of intelligent methods of adaptive energy consumption control using deep learning algorithms is considered. Such methods allow predicting load changes, regulating energy distribution between modules and ensuring continuity of communication even in the event of dynamic changes in network topology or the environment. It is shown that it is ground-based robotic systems that can serve as an energy-stable foundation for hybrid network infrastructure, complementing aerial elements and providing them with a stable connection in challenging conditions. This approach contributes to the creation of balanced systems in which key control, communication, and power distribution functions are implemented through autonomous ground modules capable of self-organisation and collective decision-making.

Keywords: mobile ground robotic platforms (UGV); unmanned aerial vehicles (UAV); hybrid networks; energy efficiency; deep learning; telecommunication systems.

Сучасні дослідження в області автономних систем управління орієнтовані на комбінацію безпілотних літальних апаратів (UAV) і мобільних наземних робототехнічних платформ (UGV) як компонентів гібридних енергетичних систем. Основною різницею між цими платформами є розподіл енергії і стабільність зв'язку. Як показано в роботі Цзен та ін. [1], енергоефективність UAV визначається маршрутом польоту, а головні втрати пов'язані з підтриманням висоти, що обмежує тривалість автономного перебування. Натомість UGV не витрачають енергію на компенсацію підйомної сили та можуть працювати безперервно протягом кількох годин чи днів. Практичні результати Міллер та ін. [2] підтверджують, що енергозалежне планування місій для UGV значно знижує споживання енергії, дозволяючи перекласти частину навантаження зв'язку з UAV на наземні вузли. Це дає змогу сформувати ієрархічну архітектуру керування, де UAV виконують роль мобільних сенсорів, а UGV — опорних комунікаційних ретрансляторів. Огляд Чжан та ін. [3] демонструє, що більшість методів підвищення енергоефективності UAV орієнтовані на мережевий рівень, але антенно-фізичні обмеження залишаються суттєвими, що знижує можливість підсилення сигналу. Сучасні інтелектуальні підходи, описані Сіранган та ін. [4], показують, що застосування глибокого навчання з підкріпленням (DRL) дозволяє налагоджувати баланс між якістю зв'язку (QoC) і енергоспоживанням у UAV-мережах. Мондал та ін. [5] розширюють цей підхід на змішані UAV-UGV системи, доводячи, що динамічний розподіл задач між платформами підвищує енергоефективність і тривалість місій без втрати стабільності каналу. Таким чином, підтверджується доцільність використання UGV як енергетично оптимальних вузлів у гібридних мережах як у мирний так і військовий часи. Вони забезпечують вищу ефективність комунікацій, можливість зниження сумарних енергетичних втрат порівняно з автономним застосуванням UAV.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Y. Zeng, R. Zhang, and T. J. Lim, "Energy-Efficient UAV Communication With Trajectory Optimization," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 16, no. 6, pp. 3747–3760, Jun. 2017, DOI: <https://doi.org/10.1109/TWC.2017.2688328>.
- [2] N. Miller, N. Goulet, and B. Ayalew, "Energy-Aware Mission Planning for Unmanned Ground Vehicle Fleets," in *Proceedings of the 2024 Ground Vehicle Systems Engineering and Technology Symposium (GVSETS)*, 2024. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://ndia-mich.org>. Дата звернення 12.09.2025.
- [3] Y. Zhang, R. Zhao, D. Mishra, and D. W. K. Ng, "A Comprehensive Review of Energy-Efficient Techniques for UAV-Assisted Industrial Wireless Networks," *Energies*, vol. 17, no. 18, p. 4737, 2024, DOI: <https://doi.org/10.3390/en17184737>.
- [4] K. Seerangan, D. Raja, M. A. Hussain, and A. Amudha, "A Novel Energy-Efficiency Framework for UAV-Assisted Networks using Adaptive Deep Reinforcement Learning," *Scientific Reports*, vol. 14, Article no. 22188, 2024, DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-71621-x>.
- [5] M. Mondal, S. Ramasamy, and P. Bhounsule, "Deep Reinforcement Learning Enabled Persistent Surveillance with Energy-Aware UAV-UGV Systems for Disaster Management Applications," *arXiv preprint*, 2025, DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2502.02666>.

Михайліченко Олексій Валерійович — аспірант кафедри комп'ютерних та інформаційних технологій і систем, e-mail: aleksejmikhajlichenko@gmail.com;

Янко Аліна Сергіївна — канд. техн. наук, доцент, старший науковий співробітник кафедри комп'ютерних та інформаційних технологій і систем, e-mail: al9_yanko@ukr.net;

Лактіонов Олександр Ігорович — канд. техн. наук, доцент кафедри автоматизації, електроніки та телекомунікацій, e-mail: laktionov.alexander@ukr.net.

Mykhailichenko Oleksiy Valeriyovych — postgraduate student of the Department of Computer and Information Technologies and Systems, e-mail: aleksejmikhajlichenko@gmail.com;

Yanko Alina Serhiivna — candidate of technical sciences, associate professor, senior researcher of the Department of Computer and Information Technologies and Systems, e-mail: al9_yanko@ukr.net;

Laktionov Aleksandr Igorovich — candidate of technical sciences, associate professor of the Department of Automation, Electronics and Telecommunications, e-mail: laktionov.alexander@ukr.net.

ЦЕНТРАЛІЗОВАНІ ТА ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНІ СИСТЕМИ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ

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

Анотація

В умовах майбутнього переходу систем релейного захисту електричної цифрової підстанції від децентралізованого принципу побудови до централізованого виникає багато питань щодо надійності та швидкодії останнього. Проведено порівняльний аналіз ефективності обох принципів.

Ключові слова: релейний захист, цифрова підстанція, мікропроцесорний пристрій релейного захисту та автоматики.

Abstract

In the context of the future transition of relay protection systems of an electrical digital substation from a decentralized principle of construction to a centralized one, many questions arise regarding the reliability and speed of the latter. A comparative analysis of the effectiveness of both principles has been conducted.

Keywords: relay protection, digital substation, microprocessor-based relay protection and automation device.

Сучасна концепція децентралізованого релейного захисту передбачає виконання системи релейного захисту електричної підстанції на основі окремих повністю автономних багатофункціональних мікропроцесорних пристроїв релейного захисту та автоматики (МП РЗА), які самостійно забезпечують функції обробки інформації та прийняття рішень. Кожний із цих МП РЗА має власні корпус, систему кнопок та індикації, блок живлення, блоки дискретних входів/виходів, обчислювальний блок та блок інтерфейсів з вищими ієрархічними рівнями. Для реалізації захисту одного приєднання використовується один або кілька МП РЗА. Кожний пристрій може мати свій внутрішній блок вимірювання аналогових сигналів (традиційний варіант) або отримувати частину дискретних сигналів і величини аналогових сигналів в цифровому коді з зовнішніх вимірювальних пристроїв (новітній варіант для цифрової підстанції). Для стандартної електричної підстанції 35/10 кВ кількість МП РЗА досягає кількох десятків, а для підстанції рівня 330 або 750 кВ їх кількість становить кілька сотень.

Концепція централізованого релейного захисту передбачає таку архітектуру побудови, де функції обробки інформації та прийняття рішень зосереджені на одному або кількох центральних вузлах, що дозволяє приймати координовані рішення щодо захисту всієї підстанції, а не окремих приєднань. В якості центрального вузла може використовуватись або спеціальний контролер, або промисловий комп'ютер (ЦПК РЗА) з відповідним програмним забезпеченням, яке реалізує всі необхідні функції обробки аналогової та дискретної інформації, релейного захисту всієї електричної підстанції (або частини). Централізована концепція передбачає отримання всієї дискретної та аналогової інформації в цифрових кодах з зовнішніх вимірювальних пристроїв. Для стандартної електричної підстанції 35/10 кВ кількість ЦПК – один або два (основний та резервний), а для підстанції рівня 330 або 750 кВ їх кількість більша.

На сьогодні електричних підстанцій, де система релейного захисту реалізована за централізованим підходом – одиниці. Всі на рівні невеликих об'єктів розподільних мереж, де результат експлуатації кількох років задовільний. Але питання про доцільність застосування концепції централізованого релейного захисту для електричних підстанцій вищих класів напруг, має ряд як переваг, так і недоліків, і на сьогодні залишається дискусійним.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Релейний захист. Цифрові пристрої релейного захисту, автоматики та управління електроенергетичних систем [Електронний ресурс] : навчальний посібник / О. С. Яндутьський, О. О. Дмитренко; НТУУ «КПІ». – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 103 с.
2. СОУ НЕК 03.100.0-22:2021 Загальні технічні вимоги до підсистем релейного захисту та протиаварійної автоматики у складі автоматизованих систем управління підстанцій 220 - 750 кВ ОЕС України. ДП «НЕК «УКРЕНЕРГО», 2021. – 37 с.
3. J. Valtari, et al., "Performance analysis of centralized protection and control solution for a distribution substation", Proceedings. PAC World Conference, 2019, pp. 1 – 9.

4. ABB White paper , “Centralized protection and control – Enhancing reliability, availability, flexibility and improving operating cost-efficiency of distribution substations”, 2022, pp. 1 – 23.

Дмитренко Олександр Олексійович – к.т.н., доцент, м. Київ, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», кафедра автоматизації енергосистем, доцент, тел.: (044) 204-95-17, (067) 2382408, e-mail: dmytrenko_a@ukr.net

Dmytrenko Oleksandr Oleksiyovych – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Kyiv, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Department of Power Systems Automation, Associate Professor, tel.: (044) 204-95-17, (067) 2382408, e-mail: dmytrenko_a@ukr.net

РЕКОНСТРУКЦІЯ ПРОТИАВАРІЙНОЇ АВТОМАТИКИ ЕНЕРГОВУЗЛА ЗАХІДНОГО РЕГІОНУ

¹ Інститут електродинаміки НАН України

Анотація

Розглянуті питання підвищення надійності роботи енергосистеми та електропостачання споживачів шляхом реконструкції існуючої протиаварійної автоматики (ПА) енерговузла Західного регіону.

Ключові слова: протиаварійна автоматика, автоматика обмеження зниження напруги, автоматика обмеження перевантаження обладнання, енергосистема, обмеження навантаження.

Abstract

Discussed the issue of improving the reliability of the power system and power supply to consumers through the reconstruction of the existing emergency automation (EA) of the Western Region power hub.

Keywords: emergency automation, undervoltage load shedding automation, overload protection automation, power system, load shedding

Вступ

Розглядаються актуальні питання забезпечення стабільної роботи енергосистеми України в умовах нових викликів та змін в енергетичній інфраструктурі. Головною метою дослідження є підвищення надійності електропостачання споживачів шляхом глибокої модернізації та реконструкції існуючої протиаварійної автоматики (ПА), що функціонує в межах Івано-Франківського енерговузла, який є одним із ключових елементів енергетичного каркасу Західного регіону. Після приєднання об'єднаної енергосистеми України до європейської мережі ENTSO-E у 2022 році суттєво змінились режими роботи, топологія та навантаження окремих ділянок мережі, особливо у західній частині країни. Синхронізація Бурштинського енергоострова з основною частиною ОЕС України і паралельна робота з європейською мережею стали чинниками, що спричинили потребу в оновленні логіки дії протиаварійних систем, зокрема автоматики обмеження зниження напруги (АОЗН) та автоматики обмеження перевантаження обладнання (АОПО).

Проведене моделювання та аналіз усталених режимів електричних мереж з урахуванням як нормальних (N-0), так і аварійних (N-1) та ремонтно-аварійних (N-2) схем. Розрахунки базувалися на сучасних підходах із залученням актуалізованих моделей локальних мереж 110 кВ Західного регіону, які були інтегровані в загальну модель магістральних мереж 220–750 кВ об'єднаної енергосистеми України. Значну увагу приділено аналізу можливих перевантажень трансформаторів, відхилень напруги на шинах підстанцій, розрахунку допустимих струмів ліній, а також врахуванню впливу відновлюваних джерел енергії (ВДЕ).

У рамках реконструкції ПА були розроблені та впроваджені детальні алгоритми роботи автоматик АОЗН та АОПО. АОЗН, розташована на підстанції 330 кВ Івано-Франківськ, забезпечує послідовне обмеження навантаження у разі небезпечного зниження напруги. АОПО встановлена на підстанціях 330 кВ Івано-Франківськ та Богородчани, і спрацьовує при перевантаженні автотрансформаторів з урахуванням напрямку перетоку потужності.

Фізична реалізація комплексу ПА передбачає використання центрального комплексу на ПС 330 кВ Івано-Франківськ та периферійних комплектів на ключових підстанціях (Надвірна, Опорна, Богородчани). Усі об'єкти обладнуються спеціалізованими шафами – АОЗН/АОПО та моніторингу. Ці шафи включають мікропроцесорні пристрої, модулі вводу/виводу аналогових і дискретних сигналів, а також елементи для аналізу та передачі інформації. Отримані з первинних перетворювачів дані автоматично обробляються, перетворюються у цифровий формат і застосовуються для генерації команд керування без втручання диспетчера. Система моніторингу

виконує реєстрацію параметрів режимів, аналіз аварійних ситуацій, побудову добових графіків, гармонічний аналіз та передавання результатів на вищі рівні диспетчерського керування.

Висновки

Таким чином, реконструкція протиаварійної автоматики дозволяє адаптувати роботу енерговузла до нових умов, враховує ризики, зміни в мережі, підключення до європейської енергосистеми та зростання долі відновлюваної енергетики. Запровадження нових алгоритмів ПА дозволяє значно підвищити надійність, керованість та безпечність функціонування Івано-Франківського енерговузла, мінімізувати наслідки аварійних ситуацій та забезпечити безперервне постачання електроенергії споживачам навіть у складних режимах роботи.

Сподинський Олександр Володимирович – провідний інженер, Інститут електродинаміки НАН України, Київ, e-mail: a.spodynskyi@gmail.com;

Михайлевський Олег Станіславович – провідний інженер, Інститут електродинаміки НАН України, Київ, e-mail: mykhailev@gmail.com;

Spodynskyi Oleksandr V. – lead engineer, Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, e-mail: a.spodynskyi@gmail.com

Mykhailevskyi Oleh S. – lead engineer, Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, e-mail: mykhailev@gmail.com

ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ РЕКУРЕНТНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО ПРОГНОЗУВАННЯ ВИРОБНИЦТВА ЕНЕРГІЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИМИ СТАНЦІЯМИ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У доповіді наведено дослідження сучасних підходів до прогнозування генерування електроенергії сонячними фотоелектричними станціями (ФЕС), що є важливим елементом розвитку відновлюваної енергетики в умовах децентралізованого енергопостачання та зростання частки «зеленої» енергії в енергобалансі. Особливу увагу приділено моделі Sensitivity-Enhanced Recurrent Neural Network (SERNN), яка поєднує переваги рекурентних нейронних мереж з адаптивною чутливістю до змін вхідних метеорологічних параметрів. Запропонований підхід дає змогу враховувати ключові кліматичні фактори, що безпосередньо впливають на обсяги виробітку сонячної енергії, зокрема глобальну сонячну радіацію, температуру навколишнього середовища, хмарність, а також сезонні коливання означених параметрів.

Ключові слова: фотоелектричні станції, прогнозування генерування, Sensitivity-Enhanced Recurrent Neural Network (SERNN), машинне навчання, метеорологічні дані, короткострокове прогнозування.

Abstract

The report presents a study of modern approaches to forecasting electricity generation by solar photovoltaic power plants (PVPPs), which is an important element in the development of renewable energy in the context of decentralized energy supply and the growing share of “green” energy in the energy balance. Particular attention is paid to the Sensitivity-Enhanced Recurrent Neural Network (SERNN) model, which combines the advantages of recurrent neural networks with adaptive sensitivity to changes in input meteorological parameters. The proposed approach makes it possible to take into account key climatic factors that directly affect solar energy production, in particular global solar radiation, ambient temperature, cloud cover, and seasonal fluctuations in these parameters.

Keywords: photovoltaic plants, generation forecasting, Sensitivity-Enhanced Recurrent Neural Network (SERNN), machine learning, meteorological data, short-term forecasting

Вступ

Інтеграція фотоелектричних станцій (ФЕС) у сучасні енергосистеми є ключовим фактором декарбонізації та розвитку відновлюваної енергетики. ФЕС зниження залежності галузі від викопних палив. Проте їх масове впровадження супроводжується низкою технічних викликів, зокрема через залежність від погодних умов. На відміну від традиційних енергогенеруючих джерел, генерування ФЕС має стохастичний характер: коливання сонячної радіації, зміни хмарності, температура повітря, а також сезонні цикли призводять до суттєвих флуктуацій.

Нестабільність генерування створює ризики для енергосистеми, особливо за умов високої проникності ВДЕ. Наприклад, завищений прогноз виробництва ФЕС може призводити до дисбалансів та змушувати операторів систем передачі залучати резервні потужності. Це не лише знижує економічну ефективність, а й ускладнює забезпечення надійності та операційної безпеки енергосистеми. Проблема посилюється в регіонах з високою кліматичною мінливістю, де відносна похибка прогнозу може досягати 20–30%, а також у перехідні періоди року (весна, осінь), коли погодні зміни відбуваються швидко й складно передбачувано [1].

Результати досліджень

Проблема точного прогнозування [2] графіків генерування фотоелектричних станцій (ФЕС) на короткостроковий період є ключовим завданням для сучасних енергосистем. Одним із перспективних методів для її вирішення є використання адаптивної моделі Sensitivity-Enhanced Recurrent Neural Network (SERNN), яка поєднує в собі переваги рекурентних нейронних мереж і механізму чутливості до змінних зовнішніх факторів. Завдяки цій особливості модель дозволяє

не лише враховувати динаміку змін погоди, але й виділяти ключові фактори, що мають найбільший вплив на генерацію ФЕС.

Для побудови моделі було використано набір даних [3], який включав ретроспективні значення сонячної радіації, температури повітря, хмарності, вологості та кількості опадів. Ці параметри відображають ключові фактори, що визначають продуктивність ФЕС у різних погодних умовах. Дані охоплювали період у 12 місяців із погодинним інтервалом, що дозволило моделі врахувати сезонні та добові коливання.

Модель побудована на основі рекурентних нейронних мереж (RNN) і включає кілька ключових компонентів: вхідний шар, блок LSTM (Long Short-Term Memory) [4], механізм уваги (Attention Mechanism) та вихідний шар для формування прогнозу. Блок LSTM виступає основним елементом, що враховує довготривалі залежності у часових рядах – це особливо важливо для задач прогнозування генерування ФЕС.

Для перевірки ефективності застосування моделі SERNN та виявлення особливостей її застосування було виконано її навчання з використанням датасету, сформованого з півгодинних вимірів протягом 2021 та 2022 років. Для навчання використовувалося 80% вибірки, а решта 20% даних – для тестування. Під час навчання використовувався механізм уваги, який дозволив виділяти найбільш значущі змінні для кожного періоду часу. Це забезпечило високий рівень адаптивності моделі до локальних кліматичних умов, що є критично важливим для експлуатації ФЕС.

Після налаштування, було проведено тестування моделі SERNN, результати якого показали такі значення максимального відносного добового відхилення: для січня 2022р. – 65%, для квітня 2022р. – 36%; для липня 2022р. – 23%; для жовтня 2022р. – 52%.

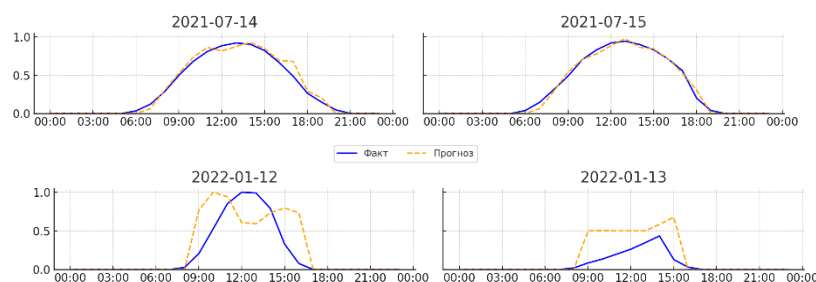


Рис. 1 – Фактичні та прогнозовані значення генерування для ФЕС-1 у липні 2021 року та у січні 2022 року

Графіки на рис. 2 демонструють, що модель SERNN загалом коректно відтворює денний профіль генерування. Найкраща відповідність спостерігається у періоди з чітко вираженою сонячною активністю, коли крива генерування має гладку, симетричну форму. Це свідчить про здатність моделі ефективно фіксувати загальні закономірності, характерні для типових безхмарних днів.

Водночас на окремих графіках помітні відхилення прогнозованих значень від фактичних, особливо в умовах хмарності та опадів у вигляді дощу або снігу. Це свідчить, що для подальшого вдосконалення системи необхідно суттєво розширити навчальну вибірку шляхом включення повного зимового циклу з прикладами різної генераційної активності, що дасть змогу забезпечити реальну адаптивність моделі до умов будь-якого сезону.

Висновки

Проведене дослідження підтверджує доцільність і ефективність використання моделі Sensitivity-Enhanced Recurrent Neural Network (SERNN) для короткострокового прогнозування генерації електроенергії фотоелектричними станціями. На відміну від традиційних підходів, зокрема лінійної регресії та класичних нейромереж LSTM, SERNN демонструє підвищену чутливість до змін ключових метеорологічних параметрів: сонячної радіації, температури, хмарності та сезонних коливань. Саме це забезпечує гнучку адаптацію моделі до швидких змін погодних умов і дає змогу отримувати кращу точність прогнозу у порівнянні з альтернативними

методами. Модель SERNN забезпечила задовільні результати середньої абсолютної похибки (MAE) як у сприятливих, так і у складних погодних умовах, включаючи періоди з різкою зміною хмарності чи температури. Особливо важливо, що модель впевнено відтворює денний профіль генерування у типові сонячні дні та демонструє здатність адаптуватися до нетипових погодних сценаріїв, що підвищує її практичну цінність для операторів мережі та власників ФЕС.

Водночас дослідження виявило низку обмежень, головне з яких – нестача якісно репрезентативних навчальних даних для окремих сезонів, особливо зимового періоду. Це призводить до зростання похибки прогнозу взимку, коли виробіток є нестабільним і надто чутливим до локальних погодних коливань. Такий результат підкреслює необхідність доповнення навчальних вибірок реальними даними з усіх сезонів і типів погодних ситуацій, а також постійного оновлення моделей під актуальні кліматичні умови. Подальші дослідження мають бути спрямовані на удосконалення сезонної репрезентативності навчальних даних, інтеграцію високоточних погодних прогнозів та розвиток гібридних підходів, що враховують фізичні обмеження реальних енергосистем.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. F. Fattori and N. Anglani, "Review on the stochastic nature of photovoltaic generation and its impact on the energy systems: Why it matters," in 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Montreal, QC, Canada, 2015, pp. 1122-1129, doi: 10.1109/ECCE.2015.7309816.
2. Д. С. Матушкін, "Огляд сучасних методів прогнозування сонячної енергії," in Матеріали Аспірантських читань пам'яті професора Артура ПРАХОВНИКА, Київ, Ukraine, 2021, pp. 34-38. [Online]. Available: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/54577>
3. О. А. Ковальчук, П. Д. Лежнюк, В. О. Комар, and С. В. Кравчук, "Прогнозування графіка генерування фотоелектричних станцій на наступну добу," pp. 320-323. [Online]. Available: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/62592>
4. П. О. Зінкевич, В. В. Шпак, and М. В. Маслій, "Порівняльний аналіз інтелектуальних методів прогнозування генерації електроенергії фотоелектричними станціями (ФЕС)," in Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційно-технічними та технологічними комплексами, Київ, Ukraine, 2024, pp. 61-62. [Online]. Available: <https://dspace.nuft.edu.ua/handle/123456789/46285>

Кулик Володимир Володимирович - д. т. н., проф. кафедри електричних станій та систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: volodymyrvkulyk@gmail.com

Затхей Максим Вікторович - аспірант, факультет електроенергетики та електромеханіки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: maxzathey@gmail.com

Kulyk Volodymyr V. D.Sc, professor of the Department of Power Plants and Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: volodymyrvkulyk@gmail.com

Zatkhei Maksym V. – doctoral student, Department of Electrical Engineering and Electromechanics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: maxzathey@gmail.com

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА СИНХРОНІЗАЦІЇ ГЕНЕРАТОРА ЛОКАЛЬНОЇ ЕНЕРГОСИСТЕМИ З СИСТЕМОЮ ЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Вінницький національний технічний університет

Анотація. У доповіді розглядаються особливості процесу синхронізації синхронного генератора, що працює в локальній енергосистемі з об'єднаною енергосистемою. Проаналізовано основні причини виникнення неузгодженості параметрів під час підключення. Визначено критичні фактори, що впливають на якість синхронізації. Запропоновано шляхи вдосконалення системи синхронізації, зокрема впровадження накопичувачів енергії та інтелектуальних алгоритмів, які забезпечують адаптивне регулювання параметрів у режимі реального часу для мінімізації перехідних процесів. Розроблені підходи сприятимуть підвищенню надійності функціонування локальних енергосистем.

Ключові слова: синхронізація, синхронний генератор, локальна енергосистема, накопичувач електроенергії, адаптивне керування.

Abstract. The report examines the peculiarities of the synchronization process of a synchronous generator operating in a local power system with an interconnected power system. The main causes of parameter mismatch during connection are analyzed. Critical factors affecting the quality of synchronization are identified. Ways to improve the synchronization system are proposed, in particular the introduction of energy storage devices and intelligent algorithms that provide adaptive real-time parameter control to minimize transient processes. The developed approaches will contribute to improving the reliability of local power systems.

Keywords: synchronization, synchronous generator, local power system, electricity storage, adaptive control.

Вступ

Синхронні генератори є основними елементами електроенергетичних систем різного рівня – від локальних до національних. Для їх підключення до мережі необхідне узгодження параметрів напруги, частоти та фази з параметрами енергосистеми. Це дозволяє уникнути значних перехідних процесів і знизити ризик пошкоджень обладнання.

Система автоматичної синхронізації зазвичай ґрунтується на регулюванні швидкості обертання первинного двигуна та струму збудження, що забезпечує поступове вирівнювання параметрів генератора з мережею. Для цього використовуються трансформатори напруги на вході й виході вимикача, які дозволяють вимірювати різницю частот і фазових кутів [1].

Якщо перед замиканням вимикача напруга генератора відрізняється від напруги мережі, після включення виникає перетікання реактивної потужності. При заниженій напрузі генератор починає її споживати, що може спричинити зниження рівня напруги в системі. Для потужних агрегатів у слабких мережах така ситуація здатна викликати порушення стійкості та навіть повне припинення електропостачання, особливо за відсутності місцевих джерел реактивної потужності.

Синхронізація генераторів з енергосистемою є ключовим етапом, що гарантує їхню безпечну роботу в паралельному режимі. Вона охоплює підключення нового чи відремонтованого обладнання, а також введення в роботу резервних агрегатів у разі аварій та приєднання генераторів локальних енергосистем у разі їх переведення на паралельну роботу. Проте на практиці цей процес часто ускладнюється і знижує загальну надійність роботи системи.

Результати дослідження

Особливою проблемою є ситуація, коли генератор синхронізують під час його роботи на локальне навантаження. У такому випадку будь-які відхилення фази, частоти чи напруги викликають значні перехідні процеси. Це особливо небезпечно для слабких мереж без достатніх джерел реактивної потужності, що характерно для локальних енергосистем. Це може призвести до нестабільності й навіть відключення цілих вузлів системи.

Традиційно енергосистема покладається на первинні та вторинні контролери генераторів для досягнення синхронізації частоти та кута зсуву фаз. Та динамічні характеристики контролерів обмежені тактовими частотами та швидкістю потоків даних, тобто постійними часу. Тож залишається все менше можливостей для прискорення процесу синхронізації завдяки підвищенню їх продуктивності. Тому потрібні ефективніші методи для досягнення синхронізації мікромереж в момент часу, коли потрібна її реконфігурація.

Акумуляторні системи накопичення енергії (СНЕ) останнім часом набули широкого розповсюдження завдяки своїй здатності ефективно накопичувати та віддавати енергію через керовані процеси заряджання та розряджання. Зокрема, в [2] показано застосування СНЕ для регулювання частоти в енергосистемі шляхом зменшення її коливань, спричинених раптовими змінами навантаження. Завдяки інтеграції з силовими перетворювачами, СНЕ можуть працювати в режимі **віртуальної синхронної машини (ВСМ)** [3], імітуючи динамічні властивості класичного синхронного генератора, зокрема його інерцію. Технологія ВСМ дає змогу знижувати амплітуду коливань частоти та потужності, забезпечувати стабільність частоти за значних відхилень навантаження, а також підвищувати надійність роботи мікромереж з високим рівнем розподіленого генерування [4]. У роботі [5] запропоновано об'єднання СНЕ зі статичним синхронним компенсатором (СТАТКОМ), що дало змогу значно підвищити динамічну стійкість мікромереж для типових збурень. Таким чином, системи накопичення енергії у поєднанні з силовими перетворювачами можуть забезпечувати швидку та ефективну синхронізацію генераторів мікромережі з енергосистемою.

На рис. 1 наведено схему запропонованої системи швидкої синхронізації (СШС) для синхронного генератора потужністю 15 МВт, напругою 6 кВ та СНЕ потужністю 300 кВт. Система накопичення з перетворювачем приєднана до мікромережі та з'єднана шинами змінного струму локальної енергосистеми. Система синхронізації складається з накопичувача, дворівневого трифазного перетворювача та блоку контролю та керування. Інтегрування інвертора та СНЕ може забезпечити кількість енергії, необхідну для регулювання частоти у мікромережі, що дає змогу вмикати зв'язок з зовнішньою мережею за короткий проміжок часу.

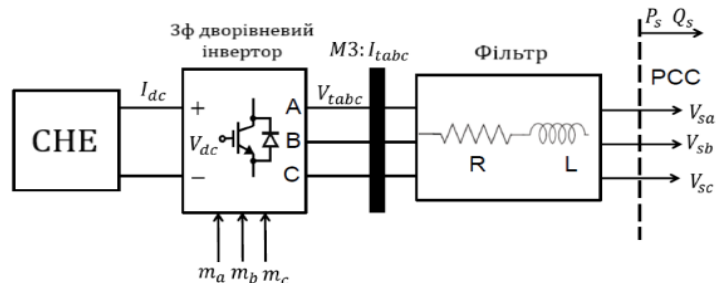


Рис. 1 Схематичне зображення системи швидкої синхронізації на базі системи накопичення енергії

Для забезпечення ефективної роботи системи швидкої синхронізації параметри акумуляторної батареї мають підтримуватися на відповідному рівні. Зокрема, **рівень заряду (SOC)** слід підтримувати в межах **60–90%** для стабільної роботи, а **смість** батареї повинна бути достатньою для завершення короткотривалого процесу синхронізації.

Висновки

Проведене дослідження підтвердило, що синхронізація генераторів з енергосистемою є ключовою умовою стабільної та безпечної роботи енергетичних об'єктів, особливо в локальних мережах. Аналіз показав низку недоліків чинних систем, серед яких недостатня швидкість, відсутність здатності до адаптації при зміні режимів та значна залежність від людського фактора під час ручного керування.

Фазові й частотні відхилення під час підключення генератора істотно підвищують ймовірність аварійних режимів, що супроводжуються електричними та механічними перевантаженнями.

У зв'язку з цим доцільним є вдосконалення систем синхронізації через впровадження інтелектуальних алгоритмів, здатних автоматично реагувати на зміну параметрів мережі, зменшувати час узгодження та підвищувати точність налаштувань. Це дасть змогу знизити кількість аварійних випадків, скоротити перехідні процеси та підвищити ефективність функціонування енергосистеми.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] I. Boldea, "Synchronous generators" (The electric power engineering series), Chapter 4, p.145, 2006.
- [2] D. Kottick, M. Blau, and D. Edelstein, "Battery energy storage for frequency regulation in an island power system," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 8, no. 3, pp. 455–459, 1993.
- [3] T. Shintai, Y. Miura, and T. Ise, "Oscillation damping of a distributed generator using a virtual synchronous generator," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 29, no. 2, pp. 668–676, 2014.
- [4] A. Chakraborty, S. K. Musunuri, A. K. Srivastava, and A. K. Kondabathini, "Integrating STATCOM and battery energy storage system for power system transient stability: a review and application," Advances in Power Electronics, vol. 2012, 2012.
- [5] G. Wang, H. Sun, D.N. Nikovski, J.A. Zhang, "Novel BESS-based Fast Synchronization Method for Power Grids", Mitsubishi Electric research laboratories, TR2017-077, 2017.

Андрешко Станіслав Леонідович – аспірант кафедри електричних станцій та систем, факультет електроенергетики та електромеханіки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, *e-mail:* stanislav.andrushko@gmail.com.

Кулик Володимир Володимирович – професор кафедри електричних станцій та систем, факультет електроенергетики та електромеханіки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, *e-mail:* volodymyrvkulyk@gmail.com

Andrushko Stanislav L. - Postgraduate student of the Electrical Stations and Systems Department, Faculty of Electrical Engineering and Electromechanics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: stanislav.andrushko@gmail.com.

Kulyk Volodymyr V. – Professor of the Electrical Stations and Systems Department, Faculty of Electrical Engineering and Electromechanics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: volodymyrvkulyk@gmail.com

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ВДЕ В БАЛАНСІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ЛОКАЛЬНИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Відновлювані джерела енергії (ВДЕ) впливають на техніко-економічні параметри електричних мереж. Зокрема, зі збільшенням кількості електроенергії в балансі ЕЕС, виробленої ВДЕ, актуальним є визначення втрат потужності та електроенергії в електричних мережах, викликаних перетоками електроенергії від ВДЕ. Аналіз прикладів показує, що фотоелектричні системи з кристалічного кремнію, які працюють протягом 8+ років, мають тем деградації – 0,5% на рік або менше. Врахування ефективності (ступеня деградації) фотоелектричних модулів в методі, алгоритмі та програмі визначення складової втрат потужності та електроенергії від ВДЕ у сумарних втратах електричних мереж дає можливість покращити прогноз генерування станції тим самим покращити енергоефективність ВДЕ в балансі електроенергії локальних електричних мереж.

Ключові слова: фотоелектричний модуль, фактор заповнення, деградація, потенційно індукована деградація.

Abstract

Renewable energy sources (RES) affect the technical and economic parameters of power grids. In particular, with the increase in the amount of electricity in the power grid balance generated by RES, it is relevant to determine the power and electricity losses in power grids caused by electricity flows from RES. Analysis of examples shows that crystalline silicon photovoltaic systems operating for 8+ years have a degradation rate of 0.5% per year or less. Taking into account the efficiency (degree of degradation) of photovoltaic modules in the method, algorithm and program for determining the component of power and electricity losses from RES in the total losses of power grids makes it possible to improve the forecast of station generation, thereby improving the energy efficiency of RES in the electricity balance of local power grids.

Keywords: photovoltaic module, fill factor, degradation, potentially induced degradation.

Вступ

У сучасних сонячних електростанціях довговічність і ефективність фотоелектричних модулів визначаються не лише якістю виготовлення, а й рівномірністю умов експлуатації фотоелектричних модулів, що експлуатуються на діючій фотоелектричній станції (ФЕС). Оскільки ФЕС займають вагомe місце в балансі потужності та електроенергії електроенергетичних систем (ЕЕС), то важливо знати, яку кількість електроенергії і за яким можливим графіком в часі ФЕС можуть її генерувати.

Результати дослідження

Одним з малопомітних, але критичних факторів деградації є температурний градієнт, що спричиняє неоднорідний розподіл температури по поверхні сонячної панелі. Це явище, здавалося б незначне на перший погляд, здатне призводити до системних втрат у генерації енергії, підвищеного зносу компонентів і навіть до виходу панелей з ладу.

До причин виникнення градієнту можна віднести:

- Затінення;
- Нерівномірне охолодження;
- Вологість і вологі плями;
- Механічні дефекти;

Для аналітичного представлення деградації фотоелектричного модуля введемо коефіцієнт деградації продуктивності сонячної панелі (Diff%) (1).

$$Diff = \frac{P_{mppNOM} - P_{mppSTC}}{P_{mppNOM}} \cdot 100\%. \quad (1)$$

Даний коефіцієнт показує відсоткове зниження максимальної вихідної потужності панелі[1-2]. Для розв'язування задачі по визначенню ефективності фотоелектричних модулів скористаємося виразом по визначенню питомої потужності на квадратний метр вираз (2)

$$\eta = \frac{FF \times (U_{oc} \times I_{cs})}{IS \cos \Theta} \quad (2)$$

Враховуючи що температура фотоелектричного модуля впливає на FF цілком правильним буде припущення, що температура впливатиме на ККД (рис. 1).

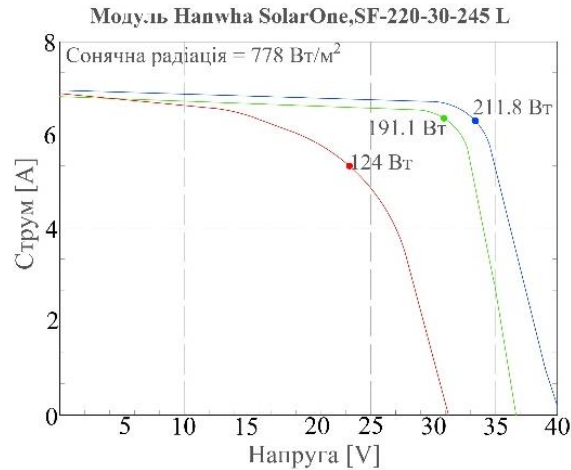


Рисунок 1 – ВАХ фотоелектричного модуля

Як видно з рисунків при зниженні температури фотоелектричного модуля (синя крива) за сталого значення сонячної інкапсуляції потужність в точці P_{mpp} зростає і це є позитивним ефектом у визначенні ККД. Але при появі градієнту температури ми можемо звернути увагу на різке зниження потужності (червона крива).

Ввівши поправочний коефіцієнт деградації ФЕМ в вираз розподілу втрат потужності у вітках (3) отримаємо складові потужності у вітках електричної мережі від потужності вузлів в яких встановлені ФЕС :

$$\dot{S}_v = \dot{D}\dot{S}_\Sigma \quad (3)$$

Оскільки електроенергія є сумою потужності у всіх режимах мережі за розрахунковий період T (4):

$$\Delta W \gg \sum_{i=1}^n \Delta P_i \times \Delta t_i \quad (4)$$

Можна визначити похибку прогнозування (5) генерування ФЕС під час балансування режиму ЕЕС.

$$\delta = \frac{\Delta W_{ВД}^{np} - \Delta W_{ВД}^{\phi}}{\Delta W_{ВД}^{np}} 100\% \quad (5)$$

Відповідно до значення похибки δ розраховується додаткова потужність до потужності заміщення втрат від ВДЕ маневреними потужностями ЕЕС або накопичувачами електроенергії [2].

Висновок

Врахування ступеня деградації фотоелектричних модулів в методі визначення потужності та електроенергії в електричних мережах та окремих її вітках, які викликані окремими ВДЕ та їх групами,

дає можливість в реальному часі оцінювати і враховувати вплив ВДЕ на баланс електроенергії в ЕЕС. В основу методу покладено математичну модель електричної мережі для визначення втрат, в якій використовуються коефіцієнти розподілу струмів у вітках схеми від вузлів з ВДЕ та поточні значення напруг вузлів схеми, що дозволяє отримати матрицю коефіцієнтів розподілу потужності у вітках схеми в залежності від потужності ВДЕ у вузлах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Limmanee, A., Songtrai, S., Udomdachanut, N., Kaewniyompanit, S., Sato, Y., Nakaishi, M., Kittisontirak, S., Sriprapha, K. and Sakamoto, Y. (2017) Degradation Analysis of Photovoltaic Modules under Tropical Climatic Conditions and Its Impacts on LCOE. Renewable Energy , 102, 199-204. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.10.052/>
2. Bouraiou, A., Hamouda, M., Chaker, A., Mostefaoui, M., Lachtar, S., Sadok, M., Boutasseta, N., Othmani, M. and Issam, A. (2015) Analysis and Evaluation of the Impact of Climatic Conditions on the Photovoltaic Modules Performance in the Desert Environment. Energy Conversion and Management , 106, 1345-1355. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.10.073>
3. Andrzej Smolarz, Petro Lezhniuk, Stepan Kudrya and others. Increasing Technical Efficiency of Renewable Energy Sources in Power Systems // Energies 2023, 16, 2828. <https://doi.org/10.3390/en16062828>.
- 4.

Луса Тетяна Олегівна — аспірант, кафедри електричних станцій та систем, ВНТУ e-mail: tanyastyskal@ukr.net
Lysa Tetyana Olehivna — postgraduate student, Department of Electrical Power Plants and Systems, VNTU e-mail: tanyastyskal@ukr.net

ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСТКИ ВТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ, ЯКІ ВИКЛИКАНІ ВІДНОВЛЮВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ

Інститут відновлювальної енергетики НАН України

Анотція

У роботі представлено метод оцінки втрат потужності та електроенергії в лініях електропередач спричинених генеруванням ВДЕ на базі типової 14-вузлової схеми IEEE. Розроблені метод, алгоритм і програма визначення складової втрат потужності та електроенергії від ВДЕ у сумарних втратах електричних мереж. В основу методу покладено математичну модель електричної мережі для визначення втрат, в якій використовуються коефіцієнти розподілу струмів у вітках схеми від вузлів з ВДЕ та вузлові напруги.

Ключові слова: фотоелектричні станції, низьковуглецеві джерела енергії, розподільчі електричні мережі, втрати потужності.

Abstract

The paper presents a method for estimating power and electricity losses in power transmission lines caused by RES generation based on a typical 14-node IEEE circuit. A method, algorithm, and program have been developed to determine the component of power and electricity losses from RES in the total losses of electrical networks. The method is based on a mathematical model of the electrical network for determining losses, which uses current distribution coefficients in the circuit branches from RES nodes and node voltages. **Keywords:** photovoltaic stations, low-carbon energy sources, distribution networks, power losses

Вступ

Низьковуглецеві відновлювані джерела енергії (НВДЕ) становлять зростаючу частку виробництва енергії в світі. Серед основних цілей та заходів Зеленого курсу передбачено кліматичну нейтральність, а саме зниження викидів парникових газів до нульового рівня до 2050 року. Зокрема мова йде про скорочення викидів в усіх секторах економіки, включаючи енергетику, транспорт, промисловість та сільське господарство. Також, особлива увага приділена енергетичному переходу, за мету якого поставлено збільшення частки відновлюваних джерел енергії та підвищення енергоефективності [1].

Результати дослідження

Проблема полягає в тому, що втрати в електричних мережах нелінійно залежать від навантаження і генерування у вузлах схеми. Підключення до системи великої кількості нових розподілених джерел, зокрема вітрових електростанцій, значно збільшує потребу в додаткових системних послугах. До таких послуг можна віднести визначення втрат потужності від перетоків потужності, спричинених новими джерелами зеленої генерації. Ці втрати необхідно враховувати під час прогнозування та визначення походження електроенергії від яких джерел живляться споживачі [2, 3].

Сумарні втрати потужності у вітках електричної мережі визначаються наступним чином [4]:

$$\Delta \dot{S}_B = \dot{V} \cdot \dot{S}_\Sigma, \quad (1)$$

де $\dot{V}$ – матриця коефіцієнтів розподілу втрат потужності у вітках схеми в залежності від потужності у вузлах схеми.

Складові втрат потужності у заданій i -й вітці (вітках) електричної мережі від протікання в ній електроенергії ФЕС і навантаження споживачів визначається наступним чином:

$$\Delta \dot{S}_{Bi} = \dot{V}_i \dot{S}_\Sigma = \sum_{i \in \theta_{ВДЕ}} \dot{V}_i \dot{S}_i + \sum_{i \in \theta_H} \dot{V}_i \dot{S}_i \quad (2)$$

де $\dot{V}_i$ вектор-рядок матриці розподілу втрат $\dot{V}$ з уточненням напруги у вузлах відповідно до значень потужності у цих же вузлах мережі; $\dot{V}_i$ – елементи вектор-рядка $\dot{V}_i$; $\dot{S}_i$ – елементи вектора потужності вузлів $\dot{S}_\Sigma$; $\theta_{ВДЕ}$ і θ_H – масиви вузлів відповідно ФЕС і навантажень споживачів.

Визначення коефіцієнтів матриці $\dot{V}$ через поточні значення вузлових напруг по суті означає перехід до лінійаризованої моделі нормального режиму електричної мережі при зафіксованих потужностях та напругах у вузлах.

Врахування втрат електроенергії від перетоків потужності ФЕС дозволяє більш точно прогнозувати генерування ФЕС під час балансування режимів ЕЕС, що в результаті забезпечує зменшення штрафних санкцій.

$$\delta = \frac{\Delta W_{ВД}^{np} - \Delta W_{ВД}^{\phi}}{\Delta W_{ВД}^{np}} \cdot 100\% \quad (1)$$

Відповідно до значення похибки δ розраховується додаткова потужність до потужності заміщення втрат від ВДЕ маневреними потужностями ЕЕС або накопичувачами електроенергії [2].

На рис. 1 наведено графіки втрат потужності в мережі: червона крива – втрати потужності в мережі, коли ФЕС відключена; синя крива – втрати потужності в мережі, коли ФЕС генерує електроенергію, зелена крива – втрати електроенергії в мережі, які викликані в ній генеруванням ФЕС.

Ефект впливу НВДЕ на втрати електроенергії в мережі залежить не тільки від її генерування, але також від навантаження споживачів. Наприклад, якщо о 13.00 генерування ФЕС залишиться, а навантаження зменшиться на 50 МВт, то сумарні втрати потужності в мережі складатимуть 7,34 МВт. Тобто, завдяки ФЕС втрати в мережі, обчислені за (1), збільшаться з –9,59 МВт до –0,734 МВт, а втрати від ФЕС становлять +2,18 МВт.

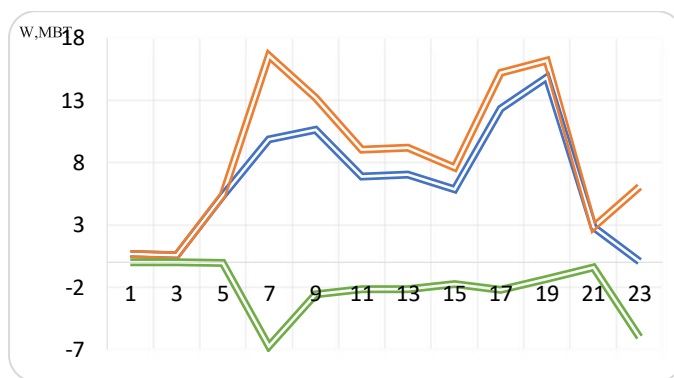


Рисунок 1 – Залежності втрат електроенергії в електричній мережі

Завдяки роботі ФЕС втрати електроенергії в мережі зменшилися на 2,18 МВт порівняно з тим, коли за того ж навантаження споживачів ФЕС не працювала

Висновки

Застосування методів визначення втрат в електричних мережах та окремих її вітках, які викликані окремими НВДЕ та їх групами, дає можливість в реальному часі оцінювати і враховувати вплив частки НВДЕ на баланс електроенергії в ЕЕС.

Значення втрат електроенергії в електричних мережах, викликаних ВДЕ, можуть використовуватися під час оперативного планування балансу електроенергії в ЕЕС та, оскільки вони є адресними, то відповідно може компенсуватися їх вартість.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Гунько, І., Лисий, В. Визначення для споживачів походження електроенергії від низьковуглецевих джерел енергії // Вісник Хмельницького національного університету – №5 (341) 2024 – С. 289-295. DOI:10.31891/2307-5732-2024-341-5-42 Режим доступу: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-341-5-42>
2. Лежнюк П.Д., Ковальчук О.А., Нікіторович О.В., Кулик В.В. Відновлювані джерела в розподільних електричних мережах: Монографія. – Вінниця: ВНТУ, 2014. – 204 с.
3. Petr Lezhniuk, Vyacheslav Komar, Olena Rubanenko, Natalia Ostra. The sensitivity of the process of optimal decisions making in electrical networks with renewable energy sources // Przegląd Elektrotechniczny, Vol 2020, №10, page 32–38. DOI: 10.15199/48.2020.10.05.

Лисий Владислав Михайлович — аспірант, інституту відновлювальної енергетики НАН України e-mail: 2e.14b.vlad.lysyi@gmail.com

Lysyi Vladyslav M. — graduate student, e-mail: 2e.14b.vlad.lysyi@gmail.com

ОГЛЯД СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ОПТИМІЗАЦІЇ В ЗАДАЧАХ БАЛАНСУВАННЯ ТА КЕРУВАННЯ РЕЖИМАМИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У дослідженні проведено огляд і класифікацію сучасних аналітичних та чисельних методів оптимізації процесів керування режимами електроенергетичних систем. Розглянуто новітні методи розв'язання задач балансування та визначено їхні переваги й обмеження. Особливу увагу приділено критеріальному підходу та методу, що ґрунтується на принципі найменшої дії. Виявлено перспективність подальшого розвитку цього підходу для підвищення ефективності балансування електроенергетичних систем.

Ключові слова: методи оптимізації режимів роботи електроенергетичних систем, оптимальне керування, балансування потужності, критеріальний метод, метод оптимізації на основі принципу найменшої дії.

Abstract

This study presents a review and classification of modern analytical and numerical optimization methods for control processes in power system operation. Advanced approaches to solving power balancing problems are considered, with their advantages and limitations identified. Particular attention is given to the criterial approach and the method based on the principle of least action. The study highlights the prospects for further development of this method to improve the efficiency of power system balancing.

Keywords: optimization methods of power system operation, optimal control, power balancing, criterial method, optimization method based on the principle of least action.

Вступ

Проектування та експлуатація електроенергетичних систем (ЕЕС) мають бути спрямовані на досягнення максимальної ефективності енергопостачання з урахуванням загальнооекономічних інтересів. Це передбачає мінімізацію витрат на виробництво та передачу енергії, а також загальну оптимізацію роботи системи, включно з балансуванням енергії й потужності, що в результаті забезпечує зменшення збитків від можливих перебоїв електропостачання, підвищення якості електроенергії та надійності роботи енергетичної інфраструктури [1].

Активний розвиток енергосистем у рамках політики кліматичної нейтральності та скорочення викидів парникових газів сприяє широкомасштабній інтеграції відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) в електроенергетичні системи, водночас невизначеності у генерації ВДЕ та енергоспоживанні породжують нові труднощі для оптимізації балансу виробництва та споживання електроенергії [2].

Основна частина

В сучасних дослідженнях оптимального керування режимами ЕЕС використовують класичні методи оптимізації (цілочисельне, лінійне, нелінійне програмування), а також варіаційні підходи і методи теорії оптимального управління [3, 4, 5]. Проте такі методи оптимізації в задачах балансування інколи виявляються недостатньо ефективними і для розв'язання складних багатовимірних задач застосовують стохастичне, динамічне програмування, евристичні та метаевристичні алгоритми, а також багатокритеріальну оптимізацію та декомпозиційні методи (Таблиця 1).

Останнім часом значного поширення набули гібридні підходи, що поєднують у собі переваги різних методів, оскільки такі поєднання дозволяють компенсувати недоліки окремих алгоритмів, підвищують швидкість збіжності та якість отримуваних розв'язків [6, 7].

Таблиця 1. Класифікація методів оптимізації в задачах балансування та керування режимами ЕЕС

Метод	Підгрупи / варіанти / підходи
Класичні методи оптимізації	Лінійне, нелінійне, цілочисельне програмування
Варіаційні підходи і методи теорії оптимального управління	Принцип максимуму Понтрягіна, прямі і непрямі варіаційні методи, модельно-прогнозне керування
Стохастичні методи	Стохастичне програмування (двоступеневе, багаступеневе, сценарне), методи Монте-Карло, робастна оптимізація, методи з умовними обмеженнями
Динамічне програмування	Принцип оптимальності Беллмана, розбиття задачі на часові етапи, ітераційне уточнення політики керування, ітераційне уточнення функції цінності
Евристичні та метаевристичні алгоритми	Генетичні алгоритми, алгоритм рою частинок, мурашині алгоритми, еволюційні алгоритми, гібридні евристики, імітаційні алгоритми
Багатокритеріальна оптимізація	Фронт Парето, метод зважених сум, ϵ -обмеження, алгоритми декомпозиції, методи прийняття рішень
Декомпозиційні методи	Просторова або часова декомпозиція, метод Бендера, метод Данцига–Вулфа, ієрархічні підходи
Гібридні підходи	Різноманітні поєднання класичних і метаевристичних методів, стохастично-детерміністичні гібриди, модельне прогнозне керування з навчальними моделями

Аналітичні методи оптимізації дозволяють отримати точні вирази для оптимальних умов, що дає змогу глибше зрозуміти залежності між параметрами системи. На відміну від чисельних підходів, вони не потребують значних обчислювальних ресурсів і забезпечують більш загальні рішення, придатні для подальшого теоретичного аналізу.

До аналітичних методів, які можна застосовувати при розв’язанні задач балансування відносяться методи теорії подібності, зокрема критеріальний метод. Цей підхід є надзвичайно перспективним, оскільки дозволяє визначати критерії подібності, що встановлюють взаємозв’язок між однойменними параметрами. Критеріальний метод створює умови для аналізу співрозмірності й чутливості результатів розрахунків у відносних одиницях при обмеженій кількості вихідної інформації [8, 9].

Інший сучасний аналітичний метод ґрунтується на принципі найменшої дії (ПНД). У межах цього підходу оптимальний розподіл навантаження між електростанціями описується через інтерпретацію кожної станції як узагальнений “економічний опір”, тоді як найраціональніший розподіл навантаження визначається як “економічний струморозподіл”. Це дозволяє формулювати задачу оптимізації як наближення поточного режиму ЕЕС до економічного, що забезпечує мінімальні втрати активної потужності. Значення економічних опорів визначаються залежно від обраного критерію оптимальності й можуть враховувати як технічні, так і економічні параметри [10].

Запропонований метод може бути вдосконалений та розширений для розв’язання задач балансування шляхом інтеграції показників екологічного навантаження на енергетичну систему. Крім того, такий метод дає можливість застосування критерію оптимальності для оцінки здатності ЕЕС виконувати функції балансування з урахуванням забезпечення балансової надійності протягом заданого часового інтервалу.

Висновок

В дослідженні проаналізовано та класифіковано існуючі підходи оптимізації оптимального керування режимами ЕЕС, а також розглянуто новітні підходи до розв’язання задачі балансування ЕЕС. Особлива увага приділена аналізу критеріального методу і методу оптимізації на основі принципу найменшої дії та виявлена перспективність подальшого вдосконалення цього методу для задач балансування ЕЕС.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Лежнюк П. Д. Оптимізація режимів електричних мереж з відновлюваними джерелами електроенергії, монографія /П. Д. Лежнюк, О. Є. Рубаненко, І. О. Гунько - Вінниця: ВНТУ, 2017. - 164 с.

2. Залізник М.П., Нетребський В.В. Енергоспоживання та екологічна ефективність: глобальний аналіз на основі індексу EPI за 2024 рік./М.П. Залізник, В.В. Нетребський // Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences, 355(4), 764-772. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-355-110>
3. Бурбело М. Й. Математичні задачі електроенергетики. Математичне моделювання електропостачальних систем : навчальний посібник / М. Й. Бурбело – Вінниця : ВНТУ, 2016. – 185 с.
4. Перхач В. С. Математичні задачі електроенергетики - Львів: Вища шк., 1989. 464 с.
5. Лежнюк П. Д. Принцип найменшої дії в електротехніці та електроенергетиці : монографія / П.Д. Лежнюк , В.В. Кулик, В.В. Нетребський, В.В. Тептя. - Вінниця : ВНТУ, 2014. - 211 с.
6. Wang, Z., Luo, Y., Wu, W. et al. Multi-objective optimization models for power load balancing in distributed energy systems. Energy Inform 8, 104 (2025). <https://doi.org/10.1186/s42162-025-00526-4>
7. Oluwatoyosi Bamisile, Dongsheng Cai et al.. Towards renewables development: Review of optimization techniques for energy storage and hybrid renewable energy systems, Heliyon 10, Issue 19, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37482>.
8. Лежнюк П.Д., Комар В.О., Добровольська Л.Н., Повстянко К.О. Відносне оцінювання засобів балансування режимів електроенергетичних систем з відновлюваними джерелами енергії /П.Д. Лежнюк, В.О. Комар, Л.Н. Добровольська, К.О. Повстянко // Вісник ВПП, вип. 3, с. 24–30, Черв. 2022.
9. Лежнюк П.Д., Буславець О.А., Рубаненко О. О. Балансування потужності та електроенергії в електроенергетичній системі з відновлюваними джерелами енергії критеріальним методом /П.Д. Лежнюк, О.А.Буславець, О.О. Рубаненко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність, вип. 1 (2), Липень 2021, с. 62-70, doi:10.20998/2224-0349.2021.01.09.
10. Лежнюк П.Д., Нагул В.І., Нетребський В.В. Метод та алгоритм оптимального керування режимами ЕЕС на підставі принципу найменшої дії /П.Д. Лежнюк, В.І. Нагул, В.В. Нетребський // Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2012, № 3. - С. 85-88.

Залізник Максим Пилипович - аспірант кафедри електричних станцій та систем, факультет електроенергетики та електромеханіки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: mzaliznyak2013@gmail.com

Нетребський Володимир Васильович - кандидат технічних наук, доцент, факультет електроенергетики та електромеханіки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: netrebskiy@ukr.net.

Науковий керівник: **Нетребський Володимир Васильович** - кандидат технічних наук, доцент, факультет електроенергетики та електромеханіки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця,

Maksym ZALIZNYAK – PhD student at the Department of Electrical Power Stations and Systems, Faculty of Electrical Power Engineering and Electromechanics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: mzaliznyak2013@gmail.com.

Volodymyr NETREBSKYI – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Faculty of Electrical Power Engineering and Electromechanics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: netrebskiy@ukr.net.

Scientific supervisor: **Volodymyr NETREBSKYI** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Faculty of Electrical Power Engineering and Electromechanics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: netrebskiy@ukr.net.

Sciences, Associate Professor, Faculty of Electrical Power Engineering and Electromechanics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: netrebskiy@ukr.net.

ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНІ ЕНЕРГЕТИЧНІ РЕСУРСИ ЯК СПОСІБ ОПЕРАТИВНОГО КЕРУВАННЯ БАЛАНСОМ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ЕЛЕКТРИЧНІЙ СИСТЕМІ З ВІДНОВЛЮВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У статті розглянуто вплив воєнних дій на електроенергетичну систему України та визначено необхідність пошуку альтернативних підходів до забезпечення надійності енергопостачання. Показано, що централізована модель ЕЕС в умовах війни виявилася вразливою через швидкі темпи руйнувань генеруючих і мережевих об'єктів, а також зростання кіберзагроз. Обґрунтовано доцільність впровадження децентралізованих енергетичних ресурсів (ДЕР), до складу яких входять сонячні та вітрові електростанції, когенераційні установки, системи зберігання енергії та технології гнучкого управління навантаженням. Розподілена генерація визначена як ключовий елемент ДЕР, що забезпечує підвищення стійкості та гнучкості енергомережі, зменшення втрат при передачі та оптимізацію балансу попиту й пропозиції. Особлива увага приділяється інтеграції «розумних» технологій, розвитку мікромереж і програм реагування на попит, які сприяють формуванню більш надійної та сталої енергосистеми. Зроблено висновок, що ДЕР є стратегічним напрямом розвитку енергетики України, оскільки вони дозволяють зменшити залежність від викопних палив, забезпечити гнучкість і безпеку енергопостачання та підтримати процес декарбонізації економіки.

Ключові слова: децентралізовані енергетичні ресурси; розподілена генерація; гнучке управління навантаженням; відновлювані джерела енергії; мікромережі; стійкість енергосистеми; SMART GRID; декарбонізація; енергетична безпека України.

Abstract

The article examines the impact of the war on Ukraine's power system and highlights the need for alternative approaches to ensure reliable energy supply. It is shown that the centralized model of the power system has proven to be highly vulnerable under wartime conditions due to the rapid destruction of generation and grid facilities, as well as the growing number of cyber threats. The feasibility of implementing decentralized energy resources (DER), which include solar and wind power plants, cogeneration units, energy storage systems, and demand response technologies, is substantiated. Distributed generation is defined as a key element of DER that improves grid resilience and flexibility, reduces transmission losses, and optimizes the balance of supply and demand. Special attention is paid to the integration of smart technologies, development of microgrids, and demand response programs, which contribute to creating a more reliable and sustainable power system. It is concluded that DER represent a strategic direction for the development of Ukraine's energy sector, as they reduce dependence on fossil fuels, ensure flexibility and security of energy supply, and support the process of economy-wide decarbonization.

Keywords: decentralized energy resources; distributed generation; demand response; renewable energy sources; microgrids; power system resilience; smart grid; decarbonization; energy security of Ukraine.

Вступ

Від початку повномасштабного вторгнення росія цілеспрямовано атакує електроенергетичну систему (ЕЕС) України. Генеруючі потужності по всіх регіонах України. Інфраструктура передачі та розподілу електроенергії були серйозно пошкоджені, по всій території країни. Станом на осінь 2024 року всі теплові електростанції (ТЕС) України зазнали ушкоджень унаслідок атак, а майже всі гідроелектростанції були зруйновані. Лише з березня по липень 2024 року було пошкоджено або знищено 9,2 ГВт генеруючих потужностей, що призвело до втрати майже половини доступних на той час резервних потужностей. Окрім фізичних ушкоджень, кількість кібератак на енергетичні об'єкти та компанії з початку повномасштабного вторгнення зростає утричі. Уже взимку 2022 року планові відключення та інші непередбачувані перебої з електропостачанням стали звичним явищем, а в найбільш постраждалих регіонах електроенергію подавали лише на кілька годин на добу. З плином часу та погіршенням стану, стало зрозуміло, що в умовах воєнного часу централізована електроенергетична система не

виправдовує себе. Швидкість руйнувань в рази перевищує швидкість відновлення мережі, що ставить нові виклики та змушує розглянути децентралізовані енергетичні ресурси як нову схему устрою електроенергетичної мережі[1].

Результати досліджень

Децентралізовані енергетичні ресурси (ДЕР) – це сукупність невеликих за потужністю, розосереджених у просторі джерел генерації, накопичувачів енергії та керованих споживачів, які інтегруються в енергосистему для покриття місцевих потреб у електричній та тепловій енергії. До них належать сонячні та вітрові установки, малі гідроелектростанції, когенераційні та біоенергетичні установки, системи акумулювання (батареї, гідроакумуючі станції), а також технології керованого навантаження. Перевагою децентралізованих енергетичних ресурсів є їхня здатність швидко розгортатися там, де вони найбільш потрібні. Крім того, багато технологій ДЕР є масштабованими, що робить їх адаптивними до змінних потреб системи — не лише на етапах проєктування та встановлення, але й у відповідь на динамічну ситуацію на місцях та виклики, які вона створює. Серед них — відновлення окупованих або пошкоджених генеруючих потужностей і постачання палива, відновлення попиту, а також упровадження заходів для підвищення енергоефективності, розвитку електрифікації та управління витратами.

Розподілена генерація, що є складовою ДЕР, передбачає локальне виробництво електроенергії з маломасштабних децентралізованих джерел, таких як сонячні панелі та вітрові турбіни. Вона відрізняється від традиційної централізованої генерації та може бути інтегрована з передовими технологіями для двонапрявленого потоку електроенергії, моніторингу та управління в режимі реального часу. Розподілена генерація підвищує стійкість мережі, зменшує втрати при передачі, сприяє використанню відновлюваних джерел енергії та формує більш сталу й надійну енергосистему [2].

Згідно існуючих даних [3] встановлено, що за допомогою розподіленої генерації можливо знизити попит на електроенергію з мережі в години пікового навантаження. Це можна реалізувати, пропонуючи споживачам стимули для встановлення дахових сонячних чи вітрових електростанцій або маломасштабних когенераційних систем (тепло- та електропостачання). Для відведення надлишкової енергії, виробленої розподіленою генерацією в години пікового навантаження, можна застосовувати системи зберігання енергії, які накопичують її в години мінімального споживання. У результаті мережа зазнає меншого стресу в моменти високого попиту на електроенергію. Це доводить, що підхід з перенесенням споживання електроенергії на години мінімального навантаження, а також технологія V2V ефективно підвищують гнучкість енергосистеми та зменшують залежність від електромережі [4].

Покращена інтеграція з передовими системами керування та комунікації, використання «розумних» інверторів і впровадження систем накопичення енергії забезпечують кращу координацію та двонаправлений потік електроенергії. Поєднання розподіленої генерації з програмами реагування на попит, підвищення гнучкості мережі та створення мікромереж сприяють підвищенню її стійкості та надійності. Політика на підтримку ініціатив, залучення споживачів і точне прогнозування додатково стимулюють впровадження розподіленої генерації. Крім того, забезпечення надійного кіберзахисту підвищує безпеку та надійність мережі. У сукупності ці заходи формують більш ефективну, надійну та сталу енергосистему завдяки широкому застосуванню розподіленої генерації в «розумних» мережах (рис. 1)[5].



Рисунок 1 - Розподілена генерація в SMART GRID

Принцип використання ДЕР відкриває можливість упровадження технологій «гнучкого» керування, що дозволяють регулювати споживання електроенергії відповідно до актуальних потреб енергосистеми. Це дає змогу адаптувати навантаження до змін попиту, знижувати ризики перевантаження та забезпечувати ефективніше використання ресурсів. Такий підхід створює умови для більш раціонального залучення відновлюваних джерел енергії, сприяючи балансуванню між виробництвом і споживанням. Оптимізоване навантаження системи допомагає узгоджувати попит і пропозицію, скорочуючи потребу в резервних потужностях. Водночас ефективність цього методу можлива лише за наявності складних алгоритмів прогнозування, здатних враховувати динаміку змін у споживанні. Управління навантаженням і підвищення енергоефективності не лише зміцнюють стабільність енергетичних систем, а й є важливим кроком на шляху до формування стійкої, економічно вигідної та екологічно безпечної енергетики. Це інвестиція в майбутнє, де сучасні технології та інноваційні рішення визначають розвиток енергосистеми відповідно до нових викликів і потреб суспільства[6].

Висновки

Децентралізовані енергетичні ресурси, такі як сонячні фотоелектричні установки та акумуляторні батареї, відкривають значні можливості для зменшення залежності України від викопних палив і допомагають країні досягати цілей декарбонізації. Електрифікація нових кінцевих споживачів, таких як теплові насоси та електромобілі, може перетворити їх на «розумні» та контрольовані навантаження, що функціонують як частина ширшого комплексу ДЕР. Це не лише підвищує гнучкість енергосистеми, але й сприяє зусиллям України з декарбонізації інших секторів, таких як опалення та транспорт.

Генеруючі потужності разом із системами передачі та розподілу залишаються під прицілом атак, що створює додатковий тиск і перевантаження на мережу. Оскільки ДЕР зазвичай розміщуються поблизу центрів споживання, вони забезпечують подачу енергії там, де вона найбільш потрібна, що допомагає зменшити потребу в окремих модернізаціях мережі та дозволяє зосередити пріоритет на інших ремонтах чи оновленнях. З огляду на те, що ці ДЕР також розташовані на периферії мережі, вони здатні надавати важливі системні послуги для розподільчої мережі, зменшувати перевантаження та вигравати час для відтермінування інвестицій у нову розподільчу інфраструктуру. Це, своєю чергою, підвищує гнучкість у плануванні та експлуатації системи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Sikorska O., Ostra N., Malogulko Ju., Teptia V., Povstianko K. Technical solutions to prevent blackouts in order to provide the population with electricity: The case of Ukraine. *Machinery & Energetics*. 2024. 15(1). 76-85. DOI: 10.31548/ machinery/1.2024.76.
2. Застосування гібридних відновлюваних енергетичних систем з метою оперативного керування балансом потужності та електроенергії в електроенергетичній системі / Лежнюк П. Д., Повстянко К. О. // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського: науковий журнал. – 2024. – № 6. – с. 114-119. – Бібліогр.: 7 назв.
3. Zhou L, Zhou Y (2023) Study on thermo-electric-hydrogen conversion mechanisms and synergistic operation on hydrogen fuel cell and electrochemical battery in energy flexible buildings. *Energy Conver Manage* 277: 116610. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116610>
4. Pudjianto D, Ramsay C, Strbac G (2007) Virtual power plant and system integration of distributed energy resources. *Renewable Power Gener* 10–16. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg:20060023> 53.
5. Behera S, Misra R (2018) SmartPeak: Peak shaving and ambient analysis for energy efficiency in electrical smart grid. *Proceedings of the 2018 Artificial Intelligence and Cloud Computing Conference*, 157–165. <https://doi.org/10.1145/3299819.3299833>
6. Інноваційні підходи для запобігання відключення і стабільного електропостачання: український досвід / В.В. Тептя, Н.В. Остра, Ю.В. Малогулко, О.В. Сікорська, К.О. Повстянко// Наукові праці НУХТ: науковий журнал. – 2025. – № 1. – с. 114-119. – Бібліогр.: 7 назв.

Лежнюк Петро Дем'янович – докт. техн. наук, проф., професор кафедри електричних станцій та систем, Вінницький національний технічний університет, email : lezhpd@gmail.com, ORCID 0000-0002-9366-3553

Затхей Катерина Олександрівна – аспірантка, кафедра ЕСС, ВНТУ, Вінниця, e-mail: ekaterina.povstyanko@gmail.com ORCID 0000-0002-5501-662X

Lezhniuk Petro Demyanovich – Dr. tech. Sciences, Prof., Prof. of the Department of Power Plants and Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnitsya, email : lezhpd@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9366-3553

Zatkhei Kateryna Oleksandrivna – graduate student, Department of Department of Power Plants and Systems, VNTU, Vinnytsia, e-mail: ekaterina.povstyanko@gmail.com ORCID 0000-0002-5501-662X

ЗАСТОСУВАННЯ ЗАСОБІВ ТЕОРІЇ ПОДІБНОСТІ ДЛЯ ВПРОВАДЖЕННЯ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

Вінницький національний технічний університет

У доповіді розглядаються можливості застосування теорії подібності та аналізу розмірностей при дослідженні й впровадженні технологій відновлюваної енергетики. Показано, що використання безрозмірних критеріїв дозволяє узагальнювати результати експериментів і забезпечує ефективне масштабування від лабораторних моделей до промислових установок.

Вступ

Сучасні виклики енергетичної безпеки помножені на необхідність декарбонізації економіки (European Green Deal) [1] обумовлюють активне впровадження відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Поряд із традиційними методами технічного аналізу дедалі більшого значення набувають системні підходи, зокрема застосування **теорії подібності та аналізу розмірностей**. Що дозволяє зводити складні багатофакторні процеси до простіших, встановлювати універсальні критерії та здійснювати перенесення результатів експериментів на реальні масштаби. Показано приклади застосування підходу у вітроенергетиці, сонячній та біоенергетиці.

Метою доповіді є дослідження можливостей застосування засобів теорії подібності при розробці та впровадженні технологій ВДЕ, а також демонстрація практичних напрямів її використання у вітроенергетиці, сонячній енергетиці та біоенергетиці.

Результати досліджень

Теорія подібності ґрунтується на π -теоремі Бекінгема, яка дозволяє звести функціональну залежність фізичних величин до відношення безрозмірних груп змінних [2]. Застосування цього підходу забезпечує універсальність опису процесів незалежно від масштабу.

Серед основних критеріїв подібності варто виділити: **число Рейнольдса** – відношення сил інерції до сил в'язкості [3]; **число Фруда** – відношення інерційних і гравітаційних сил [2]; **число Струхала** – характеристика нестационарних процесів у потоках [2].

Вітроенергетика: для аеродинамічного моделювання турбін критичною є подібність за числами Рейнольдса і Струхала. Це дозволяє екстраполювати результати лабораторних експериментів на промислові установки [2]. 3. Сонячна енергетика: у фотоелектричних системах застосування аналізу розмірностей дозволяє створювати універсальні залежності, що описують ефективність роботи модулів у різних кліматичних умовах [4]. Це забезпечує можливість адаптації технологій до регіональних особливостей інсоляції без потреби у масштабних експериментальних дослідженнях. Біоенергетика: у процесах газифікації та згоряння біомаси важливим є врахування критеріїв подібності, що відображають співвідношення між інерційними, тепловими й дифузійними процесами [5]. Це дозволяє переносити результати лабораторних експериментів на промислові біоТЕЦ, підвищуючи їхню ефективність та стабільність роботи.

Висновки

Отже, теорія подібності є потужним інструментом у розвитку відновлюваної енергетики. Використання критеріїв подібності забезпечує: універсальність опису фізичних процесів; скорочення витрат на дослідження; прогнозування ефективності ще на етапі проектування; інтеграцію з цифровими моделями та симуляціями. Подальші дослідження варто спрямувати на поєднання методів подібності із сучасними засобами комп'ютерного моделювання та оптимізації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Європейський зелений курс. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: URL. – https://ukraine-eu.mfa.gov.ua/posolstvo/galuzeve-spivrobotnictvo/klimat-yevropejska-zelena-ugoda?utm_source=chatgpt.com - дата звернення: 17.02.2025.
2. Афанасьєв Ю.О., Тиунова Н.В. *Теорія подібності: навчальний посібник*. КузГТУ, 2011 с. 45–67
3. Holman J. P. *Heat Transfer*. 10th ed. – New York: McGraw-Hill, 2012. – с. 35–42.
4. Duffie J. A., Beckman W. A. *Solar Engineering of Thermal Processes*. – New Jersey: Wiley, 2013. – с. 110–118.
5. Demirbas A. *Bioenergy: Principles and Applications*. – London: Springer, 2010. – с. 90–98.

Хороший Ярослав Олександрович - Вінницький національний технічний університет e-mail: y.khoroshyi@ukr.net

Khoroshy Yaroslav Oleksandrovyich - Vinnytsia National Technical University e-mail: y.khoroshyi@ukr.net

СТІЙКІСТЬ ЕНЕРГОСИСТЕМИ З РОЗПОДІЛЕНОЮ ГЕНЕРАЦІЄЮ

Вінницький національний технічний університет

Анотація: У роботі розглянуто перехід від традиційної централізованої моделі виробництва електроенергії до децентралізованої, що базується на принципах розподіленої генерації (РГ). Проаналізовано передумови цього переходу, зокрема екологічні та технічні обмеження централізованої енергетичної системи, а також сучасні виклики, які актуалізують потребу у впровадженні горизонтального підходу до управління енергосистемою. Наведено результати зарубіжних досліджень, що оцінюють вплив розподілених джерел енергії (РДЕ) на стабільність і динаміку розподільчих мереж. Зокрема, проаналізовано вплив рівня проникнення РДЕ на стійкість напруги, характеристики коротких замикань та відновлення системи після збурень. Визначено, що ефективність інтеграції РДЕ залежить від правильного вибору потужності, місця розташування та параметрів роботи джерел. У висновках підкреслено важливість подальших досліджень з оптимізації розміщення РГ у традиційних мережах, а також необхідність розвитку систем SCADA для забезпечення моніторингу, керування та підвищення надійності децентралізованих енергосистем.

Ключові слова: розподілена генерація; децентралізація енергосистеми; стійкість електроенергетичних мереж; динамічна стійкість; енергетична незалежність України.

Abstract: The work examines the transition from the traditional centralized model of electricity generation to a decentralized one based on the principles of distributed generation (DG). The prerequisites for this transition are analyzed, including environmental and technical limitations of the centralized energy system, as well as modern challenges that highlight the need for a horizontal approach to power system management. The paper presents the results of international studies evaluating the impact of distributed energy resources (DER) on the stability and dynamics of distribution networks. In particular, the influence of DER penetration levels on voltage stability, short-circuit characteristics, and system recovery after disturbances is analyzed. It is determined that the effectiveness of DER integration depends on the proper selection of capacity, location, and operating parameters of generation sources. The conclusions emphasize the importance of further research on optimizing the placement of DG in traditional distribution networks, as well as the need to develop SCADA systems to ensure monitoring, control, and improved reliability of decentralized energy systems.

Keywords: distributed generation; decentralization of the power system; power grid stability; dynamic stability; energy independence of Ukraine.

Вступ

Історично електрична енергія вироблялася централізовано на електростанціях, таких як вугільні, гідроелектричні, газові, атомні станції, а також великомасштабні сонячні електростанції або їхні комбінації. Ці традиційні електростанції зазвичай розташовані на віддалених територіях, тому вироблена електроенергія повинна передаватися на великі відстані та розподілятися між державними, промисловими, комерційними й побутовими споживачами [1], [2]. Ця вертикальна система підходу, коли електроенергія надходить до центрів навантаження через системи передавання та розподілу, має низку екологічних і технічних проблем. На додачу, в сьогоденних умовах роботи об'єднаної енергетичної системи (ОЕС) України [3], а саме в умовах війни, всі вищеперераховані чинники зумовили потребу у впровадженні горизонтального підходу, який передбачає більш активну роль розподіленої генерації.

Стійкість енергосистеми з розподіленою генерацією, значно підвищується завдяки децентралізації джерел енергії, що робить її менш вразливою до атак та аварій, зменшує втрати при передачі, забезпечує стабільність постачання для місцевих споживачів та зменшує залежність від централізованих джерел.

Однак підключення установок РГ до розподільчих мереж може призвести до погіршення показників стабільності енергосистеми за різних режимів навантаження через особливості розподілу потужності між мережею та РДЕ. Такі негативні наслідки можливі, якщо розподілені джерела не були належним чином змодельовані, скоординовані, оптимально розміщені та підібрані за потужністю.

Результати досліджень

Аналіз літератури та існуючих досліджень демонструє загалом позитивний вплив впровадження РДЕ в вже існуючу мережу, проте із певними нюансами. Дослідження впливу розподіленої генерації на динаміку та стійкість розподільчих мереж із використанням РДЕ Лелістада (Нідерланди) як тестової

системи було проведено в роботі [4]. Моделювання РДЕ виконано в середовищі Matlab/Simulink, де як систему, так і джерела РДЕ було лінеаризовано та проаналізовано за допомогою модального аналізу і часової симуляції (для перехідних процесів). Результати показали, що безпосереднє підключення РДЕ до мережі з використанням машин із малою інерцією може спричинити проблеми зі стабільністю.

У [5] проведено аналіз впливу різних конфігурацій і рівнів проникнення РДЕ на систему захисту розподільчих мереж, у яких як джерела РДЕ використовувалися вітрові турбіни та газові установки. Моделювання виконано для розподільчої мережі 20 кВ, у якій створювався трифазний короткий замик. Отримані результати показали, що інтеграція РДЕ у систему підвищує рівень струму короткого замикання та погіршує радіальні характеристики потоків потужності. Водночас частка внеску енергопостачальної компанії в струм короткого замикання зменшується зі зростанням рівня проникнення РДЕ.

У [6] проаналізовано стійкість розподіленої генерації в кільцевій розподільчій мережі, яка складалася з 52 шин, 44 ліній, 9 трансформаторів, 38 навантажень і 5 генераторів, серед яких 2 гідрогенератори та 3 теплові генератори, розташовані в різних вузлах. Для статичного та динамічного моделювання теплових генераторів і сонячних фотоелектричних генераторів напруги (SPVG) використовували програму Power System Analysis Toolbox (PSAT). Результати показали, що сонячна генерація у режимі керування PV не впливає на стійкість напруги так, як це відбувається у випадку теплових генераторів. Крім того, відновлення до сталого режиму після збурення відбувалося швидше у СЕС, ніж у теплового генератора.

Висновки

Необхідність впровадження РГ у розподільчих мережах для задоволення зростаючого попиту на електроенергію, зумовленого стрімкими темпами економічного розвитку, урбанізації та підвищенням рівня енергоспоживання на душу населення, – є беззаперечною. Традиційна централізована генерація вже не здатна повною мірою забезпечити ці потреби. На основі проведеного аналізу встановлено, що необхідно зосередити подальші дослідження на визначенні потужності та оптимального розташування джерел РГ у традиційних системах розподілу електроенергії з метою підвищення стійкості енергосистеми.

У перспективі впровадження систем нагляду, керування та збору даних (SCADA) для інтеграції РГ у наявні розподільчі мережі має отримати широку підтримку з боку наукової та дослідницької спільноти, оскільки це є ключовим кроком до підвищення ефективності, надійності та керованості енергосистем майбутнього.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. A. E. Airoboman, I.K. Okakwu, E.S. Oluwasogo, and O. Alayande, "On the Assessment of Power System Stability Using Matlab/Simulink Model," International journal of Energy and Power Engineering, vol. 4, pp. 51-64, 2015. DOI: [10.11648/j.ijepe.20150402.16](https://doi.org/10.11648/j.ijepe.20150402.16)
2. M. A. Aderibigbe, A.U. Adoghe, F. Agbetuyi and A.E. Airoboman. "A Review on Optimal Placement of Distributed Generators for Reliability Improvement on Distribution Network," IEEE PES/IAS Power Africa, pp. 1-5, 2021
3. Інноваційні підходи для запобігання відключення і стабільного електропостачання: український досвід / В.В. Тєптя, Н.В. Остра, Ю.В. Малогулко, О.В. Сікорська, К.О. Повстянко // Наукові праці НУХТ: науковий журнал. – 2025. – № 1. – с. 114-119. – Бібліогр.: 7 назв.
4. I. Anton, "Dynamics and Stability of Distributed Networks with Dispersed Generation," Eindhoven University of Technology, PhD Thesis 2008. URL: <https://pure.tue.nl/ws/portalfiles/portal/2495347/200712108.pdf>
5. F. S. Angel, "Impact of Distributed Generation on Distribution System," Aalborg University, M.Sc Thesis 2011.
6. K. M. Aung and Y. Aungoo "Stability Analysis of Distributed Generation in Mesh Distribution Network in Free and Open Source Software.," International Journal of Advanced Computational Engineering and Networking, vol. 4, 2016

Повстянко Оксана Олександрівна – студентка, факультет електроенергетики та електромеханіки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: povstyanko.oksana@gmail.com

Тєптя Віра Володимирівна – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електричних станцій та систем, факультет електроенергетики та електромеханіки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: teptyavira@gmail.com

Oksana Povstianko – 4th-year Bachelor's student, group 1ESM-22b, Department of Electrical Systems and Systems, Faculty of Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Vinnytsia National Technical University, email: povstyanko.oksana@gmail.com

Vira V. Teptia – Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor of the Department of Electrical Power Plants and Systems, Faculty of Electrical Power Engineering and Electromechanics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: teptyavira@gmail.com

ЗАХИСТ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ 10–110КВ ВІД ПОДВІЙНИХ ЗАМКНЕНЬ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі представлено результати моделювання та розрахунку струмів при подвійному замиканні на землю на повітряних лініях електропередачі напругою 10–110 кВ. Проведено аналіз часу спрацювання захисних пристроїв під час аварійних режимів. Для дослідження створено комп'ютерну модель трифазної електричної мережі в середовищі Matlab/Simulink, що дозволило оцінити ефективність функціонування системи захисту.

Ключові слова: подвійне замикання на землю, повітряні лінії електропередачі, струми замикання, релейний захист, моделювання, Matlab.

Abstract

The paper presents the results of modeling and calculating fault currents during double earth faults on overhead power transmission lines rated from 10-110 kV. The operation time of protection devices under fault conditions has been analyzed. A computer model of a three-phase electrical network was developed in the Matlab/Simulink environment, enabling evaluation of the protection system's performance and reliability.

Keywords: double earth fault, overhead transmission lines, fault current, relay protection, modeling, Matlab.

Вступ

Негативний вплив погодних умов може стати причиною виникнення коротких замикань, обривів проводів, а також прискорення процесів корозії арматури та пошкодження ізоляторів на повітряних лініях електропередачі (ПЛ). Такі явища значно підвищують ризик електричних пробів і зниження надійності роботи електричних мереж.

Для стабільного функціонування повітряних ліній і забезпечення безперервності електропостачання важливим є впровадження сучасних систем релейного захисту та протиаварійної автоматики. Ці системи забезпечують автоматичне відключення пошкоджених ділянок мережі в разі виникнення аварій або відхилень у роботі (наприклад, при перевантаженнях чи коротких замиканнях). Водночас ненадійність окремих елементів або недоліки в проектуванні схем релейного захисту можуть призвести до небажаних наслідків — відмови в роботі чи неселективного спрацювання захисту [1, 3].

Результати досліджень

За допомогою ППП «Matlab» розроблено модель трифазної мережі 110/10 кВ. До шини 10 кВ приєднано чотири лінії, на яких встановлено вимикачі, Q1, Q2, Q3, Q4. Ввідний вимикач позначається QBB. Навантаження ліній 3000, 500, 1650 і 1230 кВт відповідно до ліній 1–4. Модель дозволяє дослідити струми та напруги в лініях електропередач під час однофазних коротких замикань на лініях з першим (лінія 1) та другим вимикачем (лінія 2). Під час моделювання, в разі короткого замикання, відбувається перехідний процес, і модель надає можливість аналізувати параметри цього процесу. Вона також дозволяє досліджувати події в конкретний момент часу протягом заданого періоду. Також є можливість аналізувати графіки струму та напруги в вибраному вузлі схеми. Наприклад, встановивши, після ввідного вимикача, трифазний вимірюючий пристрій, модель дозволяє отримати осцилограму струму (рис.1): (жовта лінія – струм фази А, синя – фази В, помаранчева – фази С).

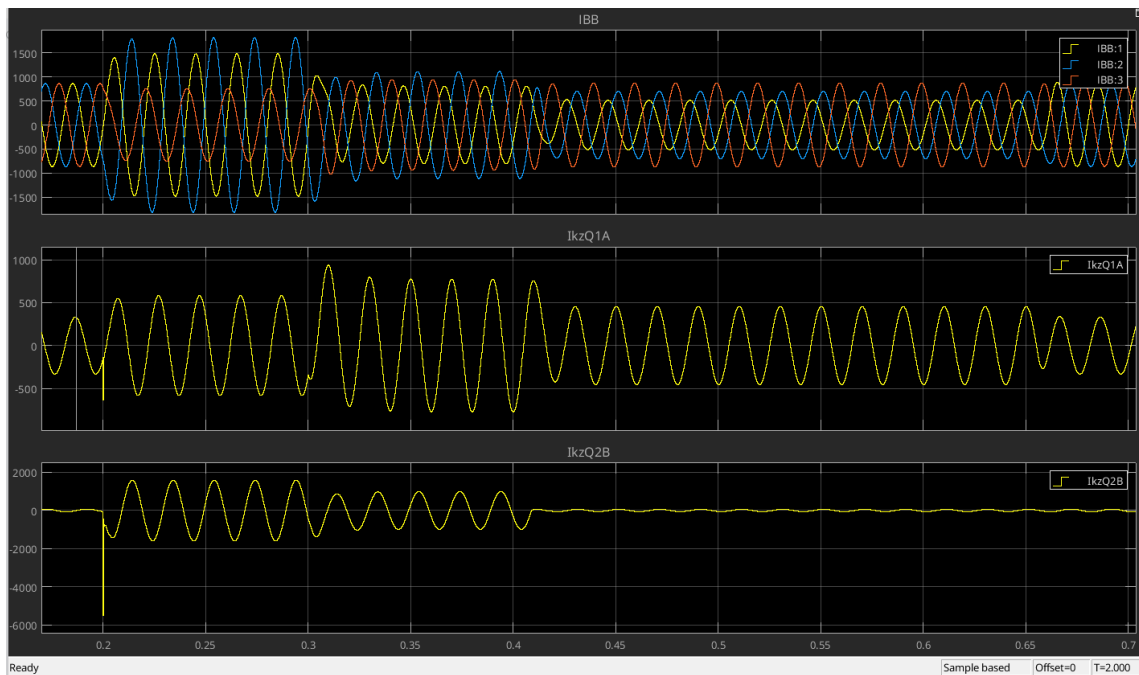


Рис.1 – Осцилограма струму на ввідному вимикачі та на лінійних вимикачах першої та другої ліній (вісь абсцис – час, вісь ординат – значення струму в А)

Максимальне значення струму фази А, першої лінії становило 940 А, а на фазі В, другої лінії 1600 А. На ввідному вимикачі ці ж значення були рівні 1480 А і 1820 А відповідно. Значення в режимі КЗ зросли в 2 рази. Моделювання коротких замикань у мережі 10 кВ на лінії 1 відбувалося в інтервалі часу 0.3 -0.65 с, а на лінії 2 - 0.2–0.4 с. Замикання на другій лінії виникло раніше, що зумовило зростання струму фази А на ввідному вимикачі. За таких умов можливе неселективне спрацювання системи захисту, коли ввідний вимикач спрацює раніше за фідерний, що призводить до знеструмлення як пошкоджених, так і справних ліній. Відключення ввідного вимикача викликає знеструмлення не лише пошкоджених ліній, а і справних ліній.

Висновок

У досліджуваному варіанті повітряної лінії електропередачі (ЛЕП) умови для забезпечення селективної роботи місцевих систем захисту (МСЗ) не завжди виконуються. Для зменшення кількості помилкових відключень ЛЕП 10 кВ необхідно збільшити час спрацювання МСЗ, що встановлений на ввідний вимикач на підстанціях на стороні 10 кВ. Це дозволить забезпечити, щоб ввідний вимикач 10 кВ спрацював пізніше за фідерні вимикачі на досліджуваній підстанції, тим самим знижуючи ймовірність ненавмисного відключення лінії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кідиба В.П. Релейний захист електроенергетичних систем: Навч. посібник, Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2015. – 533 с.
2. Пат. 73067 UA, МПК H02N 3/24. Пристрій захисту електричної розподільної мережі з ізолюваною або компенсованою нейтраллю від обриву проводу в фазі [Текст] / М. В. Кутіна (Україна). – № u201202350 ; заявл. 28.02.2012 ; опубл. 10.09.2012, Бюл. № 17. – 8 с
3. Сокол Є. І., Сендерович Г. А., Гриб О. Г. Релейний захист електроенергетичних систем: Підручник, Харків: ФОП Бровін О.В., 2020 – 306 с.

Пограничний Богдан Петрович – студент групи G3-25a, факультет електроенергетики, електромеханіки та електротехніки. Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: bohdan.work9@gmail.com

Рубаненко Олександр Євгенійович – канд. техн. наук, професор кафедри електричних станцій та систем. Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: rubanenko.o.y@vntu.edu.ua

Bohdan P. Pohranychnyi - student of group G3-25a, Faculty of Electrical Power Engineering, Electromechanics, and Electrical Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, email: bohdan.work9@gmail.com

Oleksandr Y. Rubanenko - Ph.D. in Technical Sciences, Professor of the Department of Electric Power Stations and Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: rubanenko.o.y@vntu.edu.ua

ПОРІВНЯЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ВТРАТ ПОТУЖНОСТІ У ПОВІТРЯНИХ ТА КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЯХ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі проведено аналіз втрат активної потужності у типових ділянках розподільчих мереж напругами 10 кВ та 0,4 кВ повітряного та кабельного виконання. Розрахунки виконані на основі класичних формул втрат потужності з урахуванням опору провідника, довжини лінії та робочого струму. Додатково розглянуто температурну корекцію опору провідників, що дозволяє оцінити вплив теплових умов експлуатації на величину втрат потужності. Особлива увага приділена кабельним лініям, де через умови тепловідведення та наявність ємнісних і реактивних ефектів точність розрахунків набуває критичного значення. У дослідженні наведено приклади порівняльних розрахунків для різних типів ліній, що показують не лише відмінності у втратах потужності, але й вплив довжини, струму та температури на ефективність роботи.

Ключові слова: кабельні лінії електропередавання; повітряні лінії електропередавання; втрати активної потужності.

Abstract

The work carried out a comprehensive technical analysis of active power losses in typical sections of distribution networks with voltages of 10 kV and 0.4 kV for overhead and cable versions. Calculations were made on the basis of classical formulas for power losses, taking into account conductor resistance, line length and operating current. Additionally, the temperature correction of conductor resistance was considered, which allows assessing the influence of thermal operating conditions on the magnitude of losses. Special attention is paid to cable lines, where, due to heat dissipation conditions and the presence of capacitive and reactive effects, the accuracy of calculations becomes critical. The study provides examples of comparative calculations for different types of lines, showing not only differences in power losses, but also the influence of length, current and temperature on the efficiency of operation.

Keywords: cable power lines; overhead power lines; active power losses.

Вступ

Проблема вибору між повітряними (ПЛ) та кабельними лініями (КЛ) електропередавання залишається актуальною при проєктуванні розподільних електричних мереж. Окрім миттєвих втрат, вирішальними є капітальні витрати, експлуатаційні ризики та особливості обслуговування [1]. Станом на 2011 рік загальна протяжність українських електричних мереж (ПЛ та КЛ різних класів напруг) перевищувала **1 млн км** [2]. Повітряні лінії характеризуються відносно низькою вартістю будівництва, простотою монтажу та легким доступом під час ремонту чи реконструкції. Водночас вони більш вразливі до погодних умов, обмерзання, вітрових навантажень та аварій через падіння дерев або механічні пошкодження. Кабельні лінії, навпаки, мають вищу початкову вартість прокладання та складніше технічне обслуговування, але забезпечують вищу надійність роботи, стійкість до зовнішніх впливів, зменшення кількості аварійних відключень і покращують естетичний вигляд міського середовища. Вони також дозволяють розвивати мережі в умовах щільної забудови, де будівництво ПЛ є неможливим або економічно недоцільним. Таким чином, вибір між ПЛ та КЛ має ґрунтуватися на техніко-економічному порівнянні, що враховує не лише втрати електроенергії, а й довгострокові експлуатаційні витрати, надійність, безпеку, вимоги до території та перспективи розвитку мережі [3-5].

Результати досліджень

У лініях електропередавання частина електричної енергії перетворюється в тепло через омичний опір провідників. Ці втрати називають **активними втратами потужності**, і вони прямо

залежать від сили струму, опору проводу та довжини лінії. Для оцінки втрат у лінії використовується базовий вираз (для одножильного еквіваленту):

$$P = I^2 \cdot R \cdot L, \quad (1)$$

де P — втрати активної потужності, Вт; I — струм, R — активний опір провідника на 1 км, Ом/км; L — довжина ділянки, км.

Ця залежність показує, що втрати зростають **пропорційно квадрату струму та лінійно із довжиною і опором**. Тому при проєктуванні важливо враховувати не лише напругу, але й **переріз та матеріал провідника**.

Активний опір провідників змінюється зі зміною температури. При нагріванні провідників (через проходження струму, кліматичні умови або спосіб прокладання) їх опір **збільшується**, що спричиняє додаткові втрати. Це враховується температурною поправкою:

$$R(T) = R_{20} \cdot [1 + \alpha \cdot (T - 20)], \quad (2)$$

де R_{20} — опір при 20 °C; α — температурний коефіцієнт опору (для міді $\approx 0,00393$ 1/°C, для алюмінію $\approx 0,00403$ 1/°C); T — реальна температура провідника під час роботи.

У повітряних лініях температура проводу зазвичай нижча завдяки природному охолодженню, а в кабельних лініях — вища через погане відведення тепла ґрунтом або будівельними конструкціями. Відповідно, **робочий опір КЛ буде більшим**, що безпосередньо впливає на величину втрат.

Для кількісної оцінки втрат потужності у лініях електропередавання використано репрезентативні значення опору та типові параметри повітряних і кабельних ліній напругою 10 кВ та 0,4 кВ. У таблиці 1 наведено вхідні дані — довжини ліній, розрахункові струми та питомі опори провідників, що відповідають поширеним перерізам та умовам експлуатації.

На основі цих даних виконано розрахунок активних втрат потужності без урахування температурних поправок опору. Результати подано в таблиці 2. З них видно, що при однакових значеннях струму, довжини та питомого опору втрати в повітряних і кабельних лініях 10 кВ практично однакові. У мережах 0,4 кВ втрати зростають суттєвіше через більші робочі струми при низькій напрузі.

Таблиця 1 - Репрезентативні значення опору (типові для розрахункових прикладів)

Тип лінії	L , км	I , А	R , Ом/км (типове)
ПЛ 10 кВ	1.0	100	0.60
КЛ 10 кВ	1.0	100	0.60
ПЛ 0.4 кВ	0.5	250	0.20
КЛ 0.4 кВ	0.5	250	0.15

Таблиця 2 – Результати розрахунку (без температурної корекції)

Тип лінії	L , км	I , А	R , Ом/км	ΔP , Вт
ПЛ (OHL) 10 кВ	1.0	100	0.60	6000.0
КЛ (UG) 10 кВ	1.0	100	0.60	6000.0
ПЛ (OHL) 0.4 кВ	0.5	250	0.20	6250.0
КЛ (UG) 0.4 кВ	0.5	250	0.15	4687.5

Однак у реальних умовах експлуатації опір провідника зростає через нагрівання. Це особливо актуально для кабельних ліній, де тепловідведення значно гірше, ніж у повітряних. Температурна корекція опору виконується за виразом (2).

Розглянемо приклад нагрівання провідника до $T = 60^\circ \text{C}$ для $R_{20} = 0,6 (\text{Ом} / \text{км})$:

$$R_{60} = 0.60 \cdot [1 + 0.00393 \cdot (60 - 20)] = 0.60 \cdot 1.1572 \approx 0.6943 \frac{\text{Ом}}{\text{км}} \text{ — приріст опору } \approx 15.7\%.$$

Врахування цієї температурної поправки в розрахунках втрат для ПЛ (OHL) 10 кВ за струму 100 А і довжини 1 км призводить до зростання втрат із 6,0 кВт до близько 6,94 кВт, тобто приблизно на 0,94 кВт або 15,7 %. Це демонструє, що вплив температури не є незначним і повинен обов'язково враховуватися в інженерних розрахунках, особливо для кабельних ліній, де робоча температура часто перевищує 60–70 °С. Знехтування цією поправкою призводить до недооцінки фактичних втрат енергії та неправильного вибору перерізів провідників.

На рисунку 1 наведено залежність активних втрат потужності від величини струму для повітряних (OHL) та кабельних (UG) ЛЕП напругою 10 кВ і 0,4 кВ. Характер залежності має квадратичну форму, що безпосередньо випливає з базової формули втрат (1). Із графіка видно, що для всіх типів ліній із зростанням струму втрати зростають пропорційно квадрату навантаження. Найбільші втрати спостерігаються у ПЛ 10 кВ, що пояснюється їх більшою довжиною та питомим опором провідників у порівнянні з іншими варіантами. Для мереж 0,4 кВ втрати суттєві вже за відносно невеликих струмів, що пов'язано з низьким рівнем напруги, а отже — значними робочими струмами. Різниця між ПЛ та КЛ у цьому діапазоні менш помітна, проте КЛ 0,4 кВ демонструють дещо більші втрати через підвищену температуру провідників.

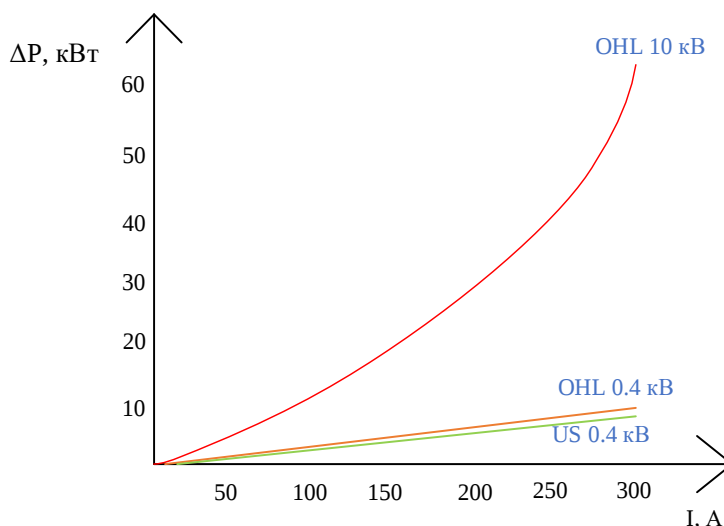


Рисунок 1 - Залежність втрат активної потужності від струму

На рисунку 2 показано вплив температури провідника на величину втрат для КЛ напругою 10 кВ. Порівнюються дві температури: 20 °С (умовна температура довідникового опору) та 60 °С (наближене значення робочої температури кабелю). Зі зростанням температури опір провідника збільшується згідно з температурною поправкою, що спричиняє зміщення кривої втрат угору. Для робочих струмів 200–300 А різниця у втрат потужності може досягати 10–15 %, що є суттєвим для практичних розрахунків. Цей ефект особливо важливий для підземних КЛ, де тепловідведення обмежене, а температура жили значно перевищує температуру навколишнього середовища.

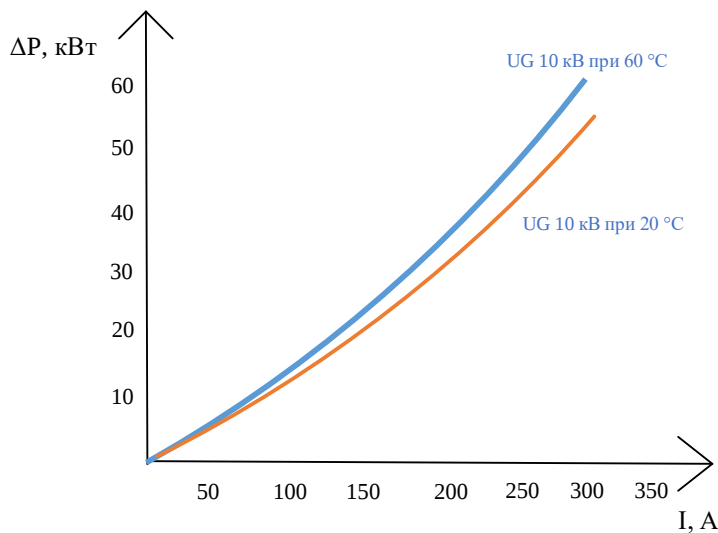


Рисунок 2 - Вплив температури на втрати потужності у КЛ напругою 10 кВ

Висновки

Проведений аналіз показав, що для коротких та помірно навантажених ділянок розподільчих мереж відмінності у рівні активних втрат між повітряними та кабельними лініями залишаються незначними. Визначальним фактором є не стільки величина втрат, скільки сукупність техніко-економічних параметрів та надійність роботи в умовах зовнішніх впливів. Особливої уваги потребують температурні умови експлуатації, які впливають на опір провідників та допустиме навантаження. Для кабельних ділянок критичним є врахування теплових режимів і прогнозування потужності, оскільки неправильна оцінка цих параметрів може призвести до перегріву та прискореного старіння ізоляції. Тому раціональним рішенням є комбінований підхід: застосування підземних ділянок у критично важливих урбанізованих зонах, тоді як повітряні лінії доцільно використовувати у менш ризикових районах. У результаті саме комплексна оцінка технічних, економічних і експлуатаційних аспектів, а не лише величина втрат, визначає оптимальний вибір типу лінії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Електричні системи і мережі. Частина 1: навчальний посібник / Ю. В. Малогулко, О. Б. Бурикін, Т. Л. Кацадзе, В. В. Нетребський. – Вінниця: ВНТУ, 2020. – 203 с.
2. Режим доступу: https://dtek.com/content/files/plan-rozvitku-sistemi-rozpodilu-kem-2020-2024.pdf?utm_source=chatgpt.com
3. R. G. Olsen, J. T. Leman. Overhead or Underground Transmission? That is (Still) the Question. T&D World, Feb 24, 2022.
4. CIGRÉ. Failure Statistics of High Voltage Underground Cables in Urban Areas; CIGRÉ publications and working groups (2020–2024).
5. Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг (НКРЕКП). План розвитку системи передачі на 2021–2030 рр., 2021.

Малогулко Юлія Володимирівна – к.т.н., доцент, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: Juliya_Malogulko@ukr.net

Глуценко Ілля Віталійович студент гр. ЕСМ-236, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця; e-mail: ilyaglusenko4@gmail.com

Malohulko Yuliya - PhD, Associate Professor, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.

Glushchenko Ilya - student, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia; e-mail: ilyaglusenko4@gmail.com

ЕНЕРГЕТИЧНА БЕЗПЕКА УКРАЇНИ: КОМПЛЕКС ЗАХОДІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі розглянуто сучасний стан та ключові виклики енергетичної системи України в умовах війни та енергетичної кризи. Проаналізовано структуру генерації та споживання електроенергії, визначено основні загрози енергетичній безпеці, включаючи військові, кібернетичні та інфраструктурні ризики. Запропоновано технічні рішення для підвищення стійкості системи електропостачання: модернізацію та розширення мереж, використання резервних і розподілених джерел енергії, автоматизацію, впровадження систем накопичення енергії, розвиток відновлюваних джерел та кіберзахист. Зазначено важливість комбінованих підходів для забезпечення безперебійного енергопостачання та підвищення енергетичної безпеки держави.

Ключові слова: енергетична безпека, модернізація мереж, розподілена генерація, ВДЕ, акумуляторні сховища, кіберзахист, стійкість електропостачання, енергетична інфраструктура.

Abstract

The article examines the current state and key challenges of Ukraine's energy system amid war and the ongoing energy crisis. It analyzes the structure of electricity generation and consumption and identifies major threats to energy security, including military, cyber, and infrastructural risks. The paper proposes technical solutions to enhance power supply resilience: grid modernization and expansion, deployment of backup and distributed energy sources, automation, energy storage implementation, renewable energy development, and cybersecurity measures. The importance of combined approaches to ensure uninterrupted power supply and strengthen national energy security is emphasized.

Keywords: energy security, grid modernization, distributed generation, renewable energy, energy storage, cybersecurity, power supply resilience, energy infrastructure.

Вступ

Енергетична криза в Україні є результатом сукупного впливу економічних, політичних, інституційних, екологічних та регіональних чинників. Її загострили війна з боку росії та окупація ключових вугільних регіонів (Донецької, Луганської, Херсонської та Запорізької областей), що забезпечували паливо для ТЕС. Додатковими викликами стали монополізація ринку, зношеність генеруючих потужностей, дотаційна підтримка нерентабельних шахт, низькі темпи розвитку відновлювальних джерел енергії (ВДЕ), інституційна розбалансованість та невизначеність у реформах енергетичного сектору. У результаті попит на енергоносії перевищив пропозицію, що створило потребу в ефективних механізмах гарантування енергетичної безпеки України [1].

Для успішного захисту енергосистеми від різноманітних атак застосовують комплексні стратегії [2]: **фізичний захист** (посилення конструкцій і матеріалів обладнання та ліній електропередавання, бар'єри й огорожі, системи відеоспостереження й сигналізації, організація охорони та патрулювання), **кіберзахист** (шифрування, автентифікація і контроль доступу, антивірусний/антишпигунський захист, регулярні оновлення програмного забезпечення, резервне копіювання та альтернативні канали зв'язку) і **електромагнітний захист** (фільтрація, стабілізація та контроль напруги/частоти, захист від перевантажень, коротких замикань і перенапруг, застосування екранованих кабелів та обладнання). Умови повномасштабного вторгнення потребують підвищення стійкості електропостачання через резервні та децентралізовані джерела (дизель-генератори, акумуляторні батареї, ВДЕ), використання систем автоматизації, контролю та релейного захисту і автоматики (зокрема автоматичне ввімкнення резерву і дистанційне керування), а також розвиток мікромереж, міні-ГЕС і СЕС, здатних працювати автономно або паралельно з централізованою системою. Поряд із надійністю та якістю критичною є **економічність**: її забезпечують оптимальний вибір схем і конструкцій

елементів мережі, раціональний розподіл навантажень за категоріями надійності, мінімізація втрат під час передавання й розподілу та підвищення енергоефективності споживачів [3].

Розглядаючи структуру генерації електроенергії в Об'єднаній енергетичній системі (ОЕС) України, важливо відмітити, що атомні електростанції складають більше половини від усього обсягу, перевищуючи 50% (рис. 1).

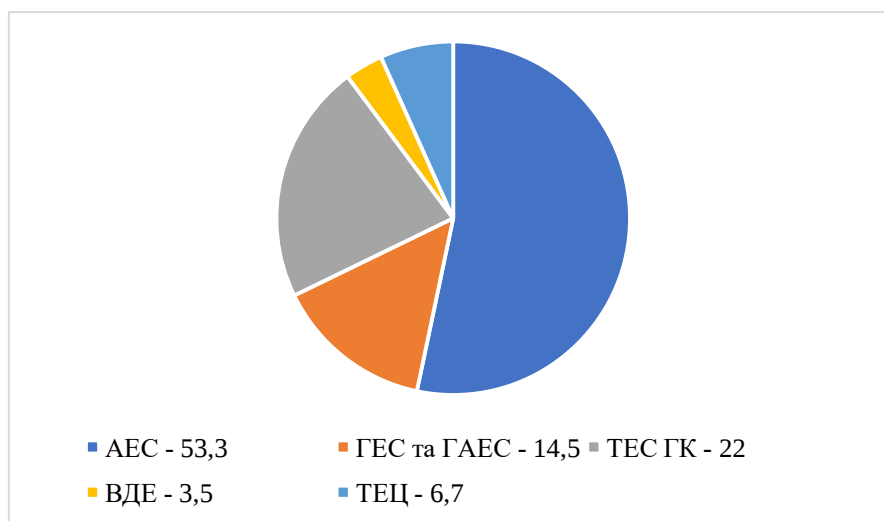


Рисунок 1 - Співвідношення генерації електроенергії в ОЕС України під час максимального навантаження, у %

Співвідношення генерації електроенергії в ОЕС України під час максимального навантаження показує внесок різних джерел у забезпечення енергосистеми. Ця інформація є ключовою для ефективного планування та управління ресурсами, оптимізації використання потужностей і підтримання стабільної роботи мережі в пікові періоди. Аналіз таких даних допомагає вдосконалювати стратегії генерації та підвищувати ефективність енергетичної системи країни. Розподіл споживання електроенергії наведено на рис. 2.



Рисунок 2 - Розподіл електроенергії серед різних груп споживачів в Україні, за винятком тимчасово окупованих територій, у %

Розподіл електроенергії між різними групами споживачів в Україні (без урахування тимчасово окупованих територій) є важливим елементом аналізу енергосистеми. Він показує, як різні сектори економіки та населення використовують електроенергію, що дозволяє враховувати

їхні специфічні потреби при формуванні стратегій надійного та стійкого енергопостачання. Такий аналіз допомагає визначити напрями для оптимізації інфраструктури з урахуванням вимог окремих секторів.

Розглянемо умовний район із населенням 100 000 осіб та площею 100 км², який залишився без електропостачання. Загальна потреба району становить близько **10 МВт**, з яких **7 МВт** припадає на житло (освітлення, опалення, побутова техніка), по **1 МВт** — на транспорт, торгівлю та громадські заклади. Забезпечення цієї потреби за допомогою генераторів потребує орієнтовно **100 млн грн**, з яких 50 млн — на придбання обладнання та 50 млн — на паливо для його безперервної роботи.

Для забезпечення електропостачання району можливе застосування кількох технічних рішень. **Найнадійнішим** є встановлення генераторів на об'єктах критичної інфраструктури, що гарантує безперебійне живлення, але потребує значних інвестицій у придбання та обслуговування великої кількості обладнання. **Розподілене генерування** передбачає встановлення генераторів на кожному об'єкті, що є дешевшим, але менш надійним через ризики перевантаження при відмові окремих вузлів. **Комбінований підхід**, який поєднує централізовані резервні джерела на критичних об'єктах і розподілені генератори, є найбільш збалансованим варіантом щодо вартості та надійності й може застосовуватись у більшості населених пунктів. У його межах для житлового сектору доцільно використовувати сонячні електростанції з газовими генераторами як резервом у нічний час; у транспорті — електробуси та зарядні станції; у торгівлі та громадських закладах — дизельні генератори як економічно ефективне рішення. Реалізація таких заходів потребує значних інвестицій, але забезпечує соціальні й економічні вигоди та підвищує стійкість електропостачання навіть у кризових умовах.

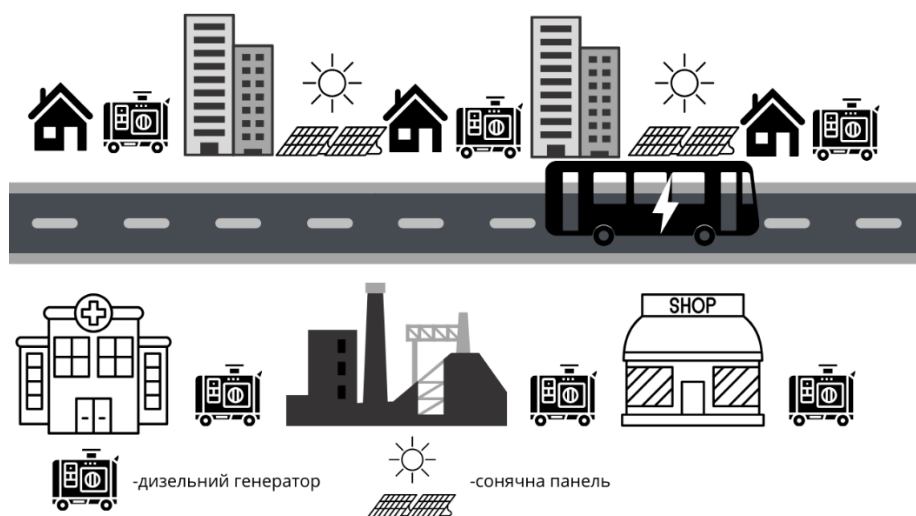


Рисунок 3 - Схема електрозалежного району під час відключення електроенергії

Сучасні виклики енергетичного сектору потребують технічних рішень, спрямованих на **розширення та модернізацію інфраструктури**, зокрема підвищення пропускної здатності ліній передачі [4]. Нові технології та матеріали забезпечують ефективну передачу енергії на великі відстані з мінімальними втратами. Важливою складовою є **автоматизація та контроль**, які дають змогу в реальному часі відслідковувати стан мереж і оперативно реагувати на відхилення, що підвищує стійкість системи та сприяє інтеграції ВДЕ.

Ключовим напрямом є **впровадження акумуляторних сховищ**, які згладжують піки навантаження, компенсують втрати та забезпечують резерв у разі аварій. **Розвиток сонячної та вітрової енергетики** зменшує залежність від традиційних джерел, сприяє децентралізації генерації та зниженню викидів [5]. Паралельно, впровадження **енергоефективних технологій** у промисловості та побуті оптимізує споживання та зменшує негативний екологічний вплив.

Важливу роль відіграють **гнучке управління попитом та точне прогнозування споживання**, які дозволяють балансувати виробництво і навантаження, запобігати перевантаженням та ефективно інтегрувати ВДЕ. У цифрову епоху зростає загроза **кібератак**, тож кібербезпека — шифрування, автентифікація, штучний інтелект для виявлення загроз, підготовлений персонал — стає критичною умовою стабільності.

Комплексне впровадження цих рішень — модернізації ліній, автоматизації, накопичувачів, ВДЕ, гнучкого управління та кіберзахисту — є ключем до підвищення **стійкості електромереж України**, запобігання блекаутам і забезпечення безперебійного енергопостачання в умовах сучасних викликів.

Висновки

Розвиток і модернізація енергетичної інфраструктури є ключовими для підвищення стійкості системи електропостачання. Встановлення нових та модернізація існуючих ліній передачі дозволяють збільшити пропускну здатність і надійність мереж. Для забезпечення живлення в кризових ситуаціях доцільно застосовувати комбінований підхід, що поєднує генератори на об'єктах критичної інфраструктури та розподілену генерацію, забезпечуючи баланс між надійністю й економічністю. Важливим напрямом є впровадження систем автоматизації та моніторингу в реальному часі, які дають змогу оперативно реагувати на загрози та підвищують гнучкість мереж. Новітні технології для побудови високоефективних ліній передачі, розвиток акумуляторних сховищ та відновлюваних джерел енергії зміцнюють мережу, компенсують втрати та підвищують її адаптивність. Не менш значущим є кіберзахист, який забезпечує стабільність енергетичної інфраструктури в умовах зростання кіберзагроз. Україна, працюючи в умовах війни, впроваджує ці рішення для підтримки енергетичної безпеки та безперебійного постачання. Її досвід може бути корисним для інших країн. Подальші кроки передбачають глибший аналіз взаємодії технологій, оцінку їх економічної ефективності та визначення викликів для реалізації в українських умовах. Модернізація, інновації та кіберзахист формують основу стійкої та надійної енергосистеми України.

Список літератури

1. Kulcsár, B., Mankovits, T., & Ailer, P. G. (2021). The renewable energy production capability of settlements to meet local electricity and transport energy demands. *Sustainability*, 13(7), 3636.
2. Karako, T., & Dahlgren, M. (2022). Complex Air Defense. *Countering the Hypersonic Missile Threat. A Report of the CSIS Missile Defense Project*.
3. Butt, O. M., Zulqarnain, M., & Butt, T. M. (2021). Recent advancement in smart grid technology: Future prospects in the electrical power network. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(1), 687-695.
4. Ghiasi, M., Niknam, T., Wang, Z., Mehrandezh, M., Dehghani, M., & Ghadimi, N. (2023). A comprehensive review of cyber-attacks and defense mechanisms for improving security in smart grid energy systems: Past, present and future. *Electric Power Systems Research*, 215, 108975.
5. Østergaard, P. A., Duic, N., Noorollahi, Y., & Kalogirou, S. (2022). Renewable energy for sustainable development. *Renewable Energy*, 199, 1145-1152.

Малогулко Юлія Володимирівна – к.т.н., доцент, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: Juliya_Malogulko@ukr.net

Сікорська Олена Вікторівна - к.т.н., доцент, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця; e-mail: olenasikorska@ukr.net

Затхей Катерина Олександрівна – аспірант, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця; e-mail: ekaterina.povstyanko@gmail.com

Malohulko Yuliya - PhD, Assoc. Prof., VNTU, Vinnytsia; e-mail: Juliya_Malogulko@ukr.net

Sikorska Olena - PhD, Assoc. Prof., VNTU, Vinnytsia; e-mail: ilyaglusenko4@gmail.com

Zatkhei Kateryna – postgraduate student, VNTU, Vinnytsia; e-mail: ekaterina.povstyanko@gmail.com

РЕЛЕЙНИЙ ЗАХИСТ ТА АВТОМАТИКА СИСТЕМИ БЕЗПЕРЕРВНОГО ЖИВЛЕННЯ ВЛАСНИХ ПОТРЕБ АЕС

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі розглянуто принципи побудови та функціонування системи релейного захисту і автоматики системи безперервного живлення власних потреб атомної електростанції (АЕС). Проведено аналіз основних споживачів першої та другої категорій надійності, а також схем живлення від робочих, резервних і автономних джерел. Розглянуто роботу агрегатів безперебійного живлення (АБЖ), дизель-генераторних (Д-Г) установок та акумуляторних батарей в нормальних і аварійних режимах. Особливу увагу приділено системам релейного захисту, що забезпечують миттєве відключення пошкоджених ділянок і автоматичне переключення навантажень на резервні джерела живлення. Запропоновано рекомендації щодо підвищення надійності функціонування систем автоматичного резервування та зменшення часу перемикання АБЖ у разі аварійного знеструмлення.

Ключові слова: релейний захист, автоматика, власні потреби АЕС, безперервне живлення, дизель-генератор, акумуляторна батарея.

Abstract

The paper examines the structure and operation principles of relay protection and automation systems for uninterrupted power supply of nuclear power plant (NPP) auxiliary systems. The analysis of key consumers of the first and second reliability categories and their power supply schemes from main, backup, and autonomous sources is provided. The operation of uninterruptible power supply units (UPS), diesel generators (DG), and battery systems in normal and emergency modes is described. Special attention is paid to relay protection systems that ensure instantaneous disconnection of faulty sections and automatic switching of loads to backup power sources. Recommendations are proposed to improve reliability and reduce switching time in case of emergency power loss.

Keywords: relay protection, automation, NPP auxiliary systems, uninterrupted power supply, diesel generator, battery.

Вступ

Безперебійне живлення власних потреб АЕС є одним із ключових чинників безпечної експлуатації ядерних енергоблоків. Надійність систем живлення визначає роботоздатність головних циркуляційних насосів, систем аварійного охолодження, контрольно-вимірювальних приладів і систем керування захисними стержнями.

Релейний захист і автоматика (РЗА) забезпечують швидке виявлення та усунення пошкоджень, а також автоматичне перемикання споживачів на резервні джерела живлення.

Метою роботи є аналіз принципів побудови систем релейного захисту та автоматики безперервного живлення власних потреб АЕС, визначення їх функцій, надійності та шляхів удосконалення.

Основна частина

Система електроживлення власних потреб АЕС складається з кількох рівнів — робочого, резервного та аварійного живлення. Для споживачів першої категорії (системи безпеки, управління реактором, аварійне освітлення) неприпустимі навіть короткочасні перерви.

Для цього передбачено агрегати безперебійного живлення (АБЖ), що включають випрямлячі, інвертори й акумуляторні батареї. У нормальному режимі вони працюють через випрямляч, а при зникненні напруги миттєво переходять на живлення від батареї.

Релейний захист у таких випадках виконує кілька основних функцій: виявлення коротких замикань і перевантажень у колах 6 кВ, 0,4 кВ і 220 В постійного струму; контроль правильності перемикання між робочим і резервним джерелом; автоматичне відключення пошкодженої ділянки й подачу живлення від альтернативного джерела.

У схемах власних потреб передбачено автоматичне введення резерву (АВР), яке спрацьовує за

зникнення напруги на робочій секції власних потреб (ВП). Для скорочення часу перемикання АВР оснащене швидкодіючими мікропроцесорними реле та тиристорними ключами, що забезпечують перехід без помітного просідання напруги.

Ключову роль у системі безперервного живлення відіграють дизель-генератори (Д-Г). Вони запускаються автоматично через 15–50 секунд після втрати зовнішнього живлення. Релейна автоматика здійснює контроль параметрів запуску, частоти обертання, напруги та синхронізації. У разі відмови одного Д-Г інший автоматично бере навантаження секції.

Для споживачів першої групи (контроль, СУЗ, АЗ) застосовується багатоступеневе резервування. Кожен АБЖ і АБ працюють незалежно, забезпечуючи живлення навіть при виході з ладу сусідніх систем. Це досягається за допомогою логічних реле блокування, які не допускають одночасного підключення двох джерел на одну секцію.

На практиці важливо, щоб система релейного захисту реагувала не лише на короткі замикання, але й на особливі режими роботи — зниження напруги, перегрів, несиметрії фаз, втрату збудження тощо. Для цього використовуються реле напруги, частоти, опору ізоляції та фазного дисбалансу.

Для підвищення надійності на сучасних енергоблоках використовують мікропроцесорні пристрої РЗА, які дозволяють проводити дистанційний контроль, діагностику і запис осцилограм аварій.

Дослідження, виконані на базі Південно-української АЕС, показали, що завдяки вдосконаленню релейного захисту й автоматики вдалося скоротити час відновлення живлення споживачів першої категорії з 0,4 с до 0,08 с, що суттєво підвищує рівень ядерної безпеки.

Також важливу роль відіграє взаємодія систем постійного та змінного струму. У разі аварії інвертори АБЖ автоматично переходять у режим живлення від батарей, а дизель-генератори підключаються для підтримання зарядного режиму.

Таким чином, безперервність живлення забезпечується комбінацією акумуляторних батарей, автоматичного введення резерву, релейного захисту й дизельної автоматики.

Перспективним напрямом розвитку є впровадження інтелектуальних систем діагностики РЗА, які аналізують стан елементів і прогнозують можливі відмови, що дозволить мінімізувати ризики втрати живлення навіть у надзвичайних ситуаціях.

Висновки

1. Система безперервного живлення власних потреб АЕС є багаторівневою структурою, що містить робочі, резервні та автономні джерела живлення.
2. Релейний захист і автоматика забезпечують оперативне виявлення пошкоджень і відновлення живлення критичних споживачів.
3. Використання мікропроцесорних пристроїв РЗА підвищує точність, швидкодію та надає можливість діагностування.
4. Комплексне застосування АБЖ, АВР і дизель-генераторів забезпечує високу надійність і безпечну роботу енергоблоку навіть у разі повного знеструмлення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Лежнюк П.Д., Рубаненко О.Є., Лук'яненко Ю.В. *Основи теорії планування експерименту*. – Вінниця: ВНТУ, 2006.
2. *Правила улаштування електроустановок (ПУЕ)*. – Київ, 2020.
3. *НП 306.2.208-2016. Вимоги до електричних систем безпеки атомних станцій*.

Буток Костянтин Андрійович – студент групи ЕС-24м, факультет електроенергетики, електромеханіки та електротехніки. Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: butok.kosta@gmail.com

Рубаненко Олександр Євгенійович – канд. техн. наук, професор кафедри електричних станцій та систем. Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: rubanenko.o.y@vntu.edu.ua

Butok Kostiantyn Andriiovych – student of group EC-24m, Faculty of Electrical Engineering, Electromechanics and Electrical Engineering. Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: butok.kosta@gmail.com

Rubanenko Oleksandr Yevheniiiovych – Ph.D. in Technical Sciences, Professor of the Department of Electric Power Stations and Systems. Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: rubanenko.o.y@vntu.edu.ua

Віртуальні електростанції як інноваційна концепція для агрегації ВДЕ

Вінницький національний технічний університет

Анотація. У роботі розглянуто віртуальні електростанції (ВЕС) як ключову технологію для вирішення проблем, пов'язаних із масовим впровадженням відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Проаналізовано механізми, за допомогою яких ВЕС агрегують численні, географічно розподілені та стохастичні джерела, такі як сонячні та вітрові станції, перетворюючи їх на єдиний, прогнозований та керований енергетичний об'єкт. Описано структуру ВЕС, її основні компоненти та принцип функціонування в контексті згладжування нестабільності генерації ВДЕ. Обґрунтовано перспективи застосування ВЕС для інтеграції ВДЕ в енергосистему України, особливо в умовах післявоєнної відбудови.

Ключові слова: віртуальна електростанція (ВЕС), відновлювані джерела енергії (ВДЕ), агрегація, розподілена генерація, сонячна електростанція (СЕС), вітрова електростанція (ВЕС), системи накопичення енергії (СНЕ), гнучкість енергосистеми.

Abstract. This work examines virtual power plants (VPPs) as a key technology for addressing the challenges associated with the widespread integration of renewable energy sources (RES). The mechanisms by which VPPs aggregate numerous, geographically dispersed, and stochastic sources, such as solar and wind power plants, are analyzed, transforming them into a single, predictable, and controllable energy asset. The structure of a VPP, its main components, and its operational principles for mitigating the instability of RES generation are described. The prospects for using VPPs to integrate RES into the Ukrainian power grid are substantiated, particularly in the context of post-war reconstruction.

Keywords: virtual power plant (VPP), renewable energy sources (RES), aggregation, distributed generation, solar power plant (SPP), wind power plant (WPP), energy storage systems (ESS), power system flexibility.

Вступ

Сучасний етап розвитку світової електроенергетики характеризується фундаментальними трансформаціями, зумовленими глобальними кліматичними викликами та стрімким технологічним прогресом. Ключовими векторами цих змін є декарбонізація, що передбачає поступову відмову від викопних палив; децентралізація, яка веде до появи значної кількості розподілених генеруючих потужностей; та цифровізація, що відкриває нові можливості для інтелектуального управління енергетичними потоками [1-2].

Інтеграція значних обсягів відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), таких як сонячні та вітрові електростанції, створює серйозні виклики для стабільності та надійності енергосистем через їхню стохастичність та нерівномірність генерації [2]. У цьому контексті віртуальні електростанції (ВЕС) постають як інноваційна концепція та практичний інструмент, що дозволяє ефективно агрегувати та координувати роботу різноманітних розподілених енергетичних ресурсів (РЕР), забезпечуючи їхню синергетичну взаємодію та перетворюючи їх на єдиний керований об'єкт.

Матеріал та результати дослідження

Віртуальні електростанції (Virtual Power Plant, VPP) представляють собою новий тип електричних станцій, що базуються на розподілених технологіях та стратегіях керування системами Smart Grid. По суті, ВЕС – це хмарна інформаційно-технологічна (ІТ) система, до якої підключені географічно розподілені джерела енергії (часто невеликої та середньої потужності), споживачі цієї енергії та системи її накопичення. Така мережа децентралізованих енергетичних ресурсів об'єднується та керується централізовано з метою забезпечення надійного електропостачання [3].

Ключовими компонентами кожної віртуальної електростанції є :

- Розподілені енергетичні ресурси (PER): Це можуть бути генеруючі установки середнього розміру, такі як вітрові електростанції (ВЕС) та сонячні електростанції (СЕС), малі гідроелектростанції, когенераційні установки. Важливу роль відіграють також гнучкі споживачі електроенергії, які мають енергетичні активи з властивою гнучкістю, що може бути використана шляхом реагування на попит (Demand Response). Невід'ємною частиною є гнучкі системи накопичення енергії, наприклад, акумуляторні накопичувачі. [3-4]
- Споживачі: Активні та пасивні споживачі електроенергії, підключені до системи.
- Системи зберігання енергії (СЗЕ): Як вже зазначалося, СЗЕ є критично важливим елементом, що забезпечує гнучкість ВЕС, дозволяючи накопичувати енергію в періоди її надлишку та віддавати в мережу під час пікових навантажень або дефіциту генерації. [2]
- Програмне забезпечення (централізована ІТ-платформа): Це "мозок" ВЕС, що здійснює моніторинг, координацію, оптимізацію та контроль усіх підключених енергетичних активів в режимі реального часу.

Принцип функціонування ВЕС полягає в інтелектуальній агрегації та координації роботи різноманітних PER таким чином, щоб вони функціонували як єдиний, узгоджений об'єкт, здатний надавати електроенергію та системні послуги. Центральна система управління ВЕС розподіляє доступну енергію між споживачами, оптимізує процеси її накопичення в СЗЕ, а також здійснює обмін та торгівлю електроенергією як всередині самої ВЕС (між її учасниками), так і на зовнішніх енергетичних ринках. [3]

Впровадження віртуальних електростанцій супроводжується низкою суттєвих переваг, які охоплюють технічні, економічні, екологічні та соціальні аспекти. Однак, як і будь-яка нова технологія, ВЕС мають певні недоліки та стикаються з викликами на шляху свого поширення (табл. 1).

Таблиця 1 – Переваги та недоліки ВЕС

Переваги	Недоліки
Зменшення залежності від імпорту енергії, підвищення енергобезпеки. Гнучкість розташування PER. Стабілізація мережі, покращення якості електроенергії. Підвищена стійкість до форс-мажорів.	Потреба у відповідній ІКТ-інфраструктурі та модернізації електромереж. Потреба у кваліфікованому персоналі. Складність координації великої кількості PER.
Зниження витрат на електроенергію за рахунок ВДЕ та оптимізації. Можливість заробітку для власників PER. Зменшення потреби в дорогих пікових станціях.	Високі початкові інвестиції в PER та СНЕ для окремих учасників. Залежність від державної підтримки та фінансових стимулів на початкових етапах.
Значне зниження викидів парникових газів та інших забруднювачів. Сприяння декарбонізації енергетики.	Потенційний локальний негативний вплив окремих PER (наприклад, ВЕС на птахів, СЕС на землекористування). Питання утилізації компонентів PER та СНЕ.
Активне залучення споживачів до енергоринку, розвиток просьюмерства. Підвищення обізнаності суспільства щодо сучасних енергетичних технологій.	Відсутність або недосконалість законодавчої та регуляторної бази. Необхідність розробки чітких правил функціонування ринку ВЕС та статусу агрегаторів.

Попри низку переваг, повномасштабне впровадження ВЕС стикається з певними викликами, зокрема, необхідністю вдосконалення нормативно-правової бази, розбудови відповідної інфраструктури та подолання економічних бар'єрів. Однак, глобальні тенденції та успішний досвід багатьох країн свідчать про високі перспективи цієї технології. [4]

Для України, особливо в контексті післявоєнного відновлення та нагальної потреби у підвищенні енергетичної стійкості та безпеки, розвиток ВЕС на базі розподіленої генерації може

стати одним із стратегічних напрямків. Такий підхід дозволяє одночасно вирішувати завдання енергетичної безпеки (за рахунок диверсифікації та зниження вразливості до атак), децентралізації енергосистеми, інтеграції відновлюваних джерел енергії та залучення інвестицій в енергетичний сектор. Досвід європейських країн у створенні ринків для допоміжних послуг та інтеграції агрегаторів може слугувати цінним орієнтиром для України при розробці власної моделі ринку ВЕС, адаптованої до національних особливостей, поточних викликів та довгострокових стратегічних цілей розвитку. [4-5]

Висновки

Віртуальні електростанції є інноваційним та багатофункціональним інструментом, що відіграє дедалі важливішу роль у модернізації сучасних електроенергетичних систем.

Шляхом інтелектуальної агрегації, координації та використання систем накопичення енергії, ВЕС перетворюють розрізнені та непередбачувані об'єкти ВДЕ на повноцінного, надійного та економічно ефективного учасника енергоринку.

Для України, що стоїть на шляху відновлення та модернізації енергетичного сектору, впровадження технологій ВЕС має стати одним із наріжних каменів побудови нової, стійкої та незалежної енергосистеми з високою часткою чистої енергії.

Список використаної літератури

1. Лежнюк П.Д., Ластівка В. Б. Підвищення ефективності відновлювальних джерел енергії в електроенергетичних системах / В. Б. Ластівка, П. Д. Лежнюк // VIII Міжнародна студентська наукова конференція «Модернізація та сучасні українські і світові наукові дослідження», м. Луцьк, 24 січня 2025 р. – Луцьк, 2025. – С. 172. – ISBN 978-617-8440-45-9.

2. Лежнюк П.Д., Малогулко Ю. В., Ластівка В. Б. Вибір засобів балансування режимів локальних електроенергетичних систем з відновлюваними джерелами енергії / Лежнюк П.Д. Малогулко Ю. В., Ластівка В. Б. // Контроль і управління в складних системах (КУСС-2024), ВНТУ, Вінниця, 16-17 жовтня 2025 р.

3. Малогулко Ю. В. Дослідження функціонування віртуальних електростанцій [Електронний ресурс] / Ю. В. Малогулко, Н. О. Пасло, В. Б. Ластівка // Матеріали LII науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ, Вінниця, 21-23 червня 2023 р.

4. Лежнюк П.Д., Ластівка В. Б. Оптимізація роботи відновлюваних джерел енергії в електроенергетичних системах / В. Б. Ластівка, П. Д. Лежнюк // Матеріали VI Міжнародної студентської наукової конференції «Міждисциплінарні наукові дослідження та перспективи їх розвитку», м. Миколаїв, 14 березня 2025 р. – Миколаїв, 2025. – С. 35. – ISBN 978-617-8440-58-9.

5. Малогулко Ю. В. Вплив російсько-української війни на функціонування відновлюваних джерел енергії / Ю. В. Малогулко, А. О. Гресько // Матеріали LII науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ, Вінниця, 21-23 червня 2023 р.

6. Malogulko Yu. The development renewable energy sources problems during the war / Malogulko Yu., Kovalchuk N., Lastivka V. // Znanstvena misel journal. №100/2023, pp. 34-37. ISSN 3453-9875.

Лежнюк Петро Дем'янович - доктор техн. наук, професор, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: lezhpd@gmail.com

Ластівка Вікторія Богданівна – студентка групи ЕСМ-25м, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: vlastivka19@gmail.com

Lezhniuk Petro – dr. eng. sc, professor, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.

Lastivka Vika – student, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.

АЛГОРИТМИ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ МІКРОМЕРЕЖАМИ В УМОВАХ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

Вінницький національний технічний університет;

Анотація

У роботі розглянуто сучасні підходи до оптимального керування мікромережами в умовах децентралізованих енергосистем із високою часткою відновлюваних джерел енергії. Метою дослідження є розробка та порівняльний аналіз алгоритмів керування потоками енергії для мінімізації операційних витрат, підвищення надійності електропостачання та зниження енергетичних дисбалансів. Представлено математичну модель мікромережі, проведено аналіз класичних та інтелектуальних методів оптимізації (PSO, GA, MPC, ML). Результати моделювання підтвердили ефективність інтелектуальних алгоритмів, що дозволяють зменшити втрати електроенергії на 8–12% і підвищити стабільність роботи системи. Робота має прикладне значення для проектування локальних енергетичних систем у громадах і промислових об'єктах..

Ключові слова: мікромережа, оптимальне керування, відновлювані джерела енергії, інтелектуальні алгоритми, енергетичний баланс, PSO, GA, MPC.

Abstracts

The paper examines modern approaches to optimal control of microgrids operating in decentralized power systems with a high share of renewable energy sources (RES). The aim of the study is to develop and compare energy flow control algorithms to minimize operating costs, increase power supply reliability, and reduce network imbalances. A mathematical model of the microgrid is presented, and both classical and intelligent optimization methods (PSO, GA, MPC, ML) are analyzed. Simulation results demonstrate that intelligent optimization algorithms reduce energy losses by 8–12% and enhance system stability. The study has practical significance for the design of local energy systems in communities and industrial facilities..

Keywords: microgrid, optimal control, renewable energy sources, intelligent algorithms, energy balance, PSO, GA, MPC.

Вступ

Актуальність теми зумовлена глобальними тенденціями переходу енергетики від централізованої до децентралізованої моделі, де зростає роль локальних джерел відновлюваної енергії (ВДЕ). У цьому контексті мікромережі (Microgrids, MG) стають ключовим елементом сучасних енергосистем, адже здатні працювати як у складі загальної мережі, так і в автономному режимі. Водночас інтеграція ВДЕ супроводжується низкою проблем — нестабільністю генерації через зміну погодних умов, потребою в балансуванні попиту та пропозиції, необхідністю використання накопичувачів енергії та оптимізації енергетичних потоків.

Метою дослідження є аналіз, розробка та порівняння алгоритмів оптимального керування мікромережами в умовах децентралізованої енергетики для підвищення ефективності використання ресурсів і стабільності енергопостачання. Наукова новизна роботи полягає в поєднанні математичного моделювання, методів оптимізації та інтелектуальних алгоритмів (PSO, GA, MPC) для створення ефективних стратегій керування мікромережами. Особливу увагу приділено впливу нестабільності ВДЕ, інтеграції локальних алгоритмів в умовах українського енергоринку та визначенню оптимальних підходів до керування накопичувачами енергії.

Методи

Об'єктом дослідження є процес оптимального керування потоками енергії в мікромережі, що фун-

кціонує в умовах децентралізованої енергетики. Предметом — алгоритми та методи оптимізації (лінійне, квадратичне, динамічне програмування, MPC, PSO, GA), спрямовані на мінімізацію витрат і підвищення стабільності роботи системи. Мікромережа моделюється як сукупність генераторів ВДЕ, накопичувачів енергії, споживачів і точки підключення до мережі, між якими виконується баланс потужності. Розроблена математична модель описує динаміку заряджання/розряджання ESS, обмеження потужностей та цільову функцію мінімізації операційних витрат. Для оптимізації застосовано класичні (лінійне, квадратичне, динамічне програмування) та інтелектуальні методи (MPC, PSO, GA, машинне навчання). Вони дозволяють враховувати прогнозовану генерацію ВДЕ, змінність навантаження та ринкові тарифи. Ефективність алгоритмів оцінюється за показниками: загальні витрати на електроенергію, коефіцієнт автономності, втрати енергії, відхилення напруг та час реакції системи.

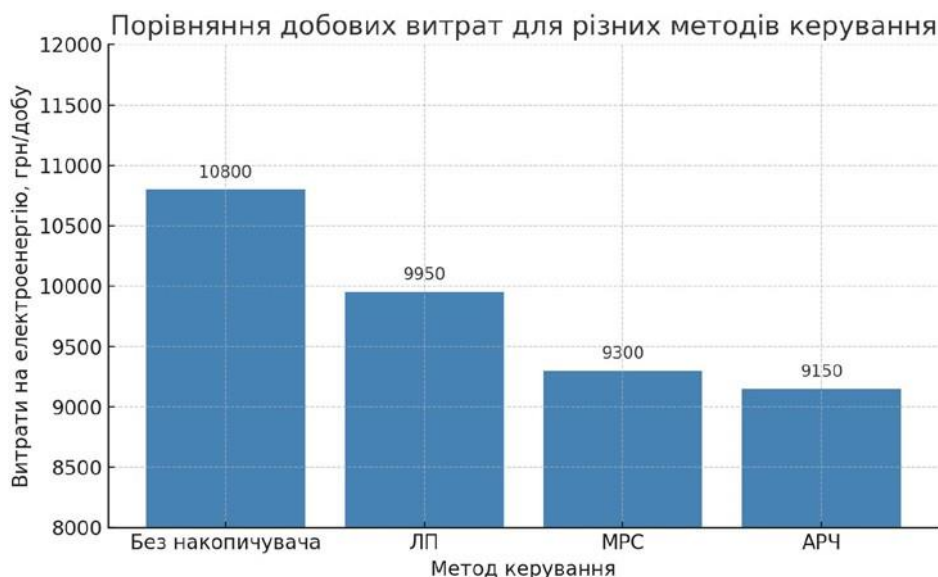
Результати дослідження

Моделювання умовної мікромережі сільської громади потужністю 200 кВт (СЕС), 100 кВт (ВЕС) та з накопичувачем 400 кВт·год показало ефективність застосування інтелектуальних методів керування. Оптимізація потоків енергії виконувалась за допомогою лінійного програмування, предиктивного керування (MPC) та алгоритму рою частинок (PSO).

Результати свідчать, що використання накопичувача енергії з інтелектуальним керуванням дозволяє:

- зменшити добові витрати на електроенергію до **9 150 грн** (економія **≈15 %** порівняно з базовим режимом без ESS);
- підвищити частку власної генерації з **42 %** до **62 %**;
- знизити втрати енергії до **2,7 %**.

Найкращі результати показали методи **MPC** та **PSO**, які забезпечують гнучке балансування потоків енергії, оптимальне використання акумулятора та зниження купівлі енергії з мережі у вечірні години. Таким чином, інтелектуальні алгоритми оптимального керування підвищують енергоефективність і стабільність роботи мікромережі на **14–16 %** у порівнянні з традиційними підходами.



Графік 1. Порівняння добових витрат

Висновки

Застосування інтелектуальних алгоритмів керування, зокрема MPC та PSO, дозволяє підвищити енергоєфективність мікромережі, зменшити витрати на електроенергію та забезпечити стабільну роботу системи в умовах змінної генерації ВДЕ.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Григор'єва Т.І., Шульга О.М., Мартинов С.М. Відновлювана енергетика: підручник. – Київ: КПІ ім.

Ігоря Сікорського, 2021. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/42547>

2. KNESS Group. Технічний звіт про систему PV.Forecast. — Вінниця, 2023.
3. Укренерго. Аналітичний звіт з інтеграції ВДЕ. — 2024.
4. Стрембіцький П., Юхимчук М., Лесько В., Перепелиця С. (2025). Централізований моніторинг інфраструктури з використанням системи THANOS: перспективи та виклики. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences, 347(1), 417-422. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-347-57>
5. ПЕРЕПЕЛИЦЯ, С., ЮХИМЧУК, М., ЛЕСЬКО, В. (2025). МОДЕЛЮВАННЯ КІБЕРФІЗИЧНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ В УМОВАХ НЕГАТИВНИХ ЗОВНІШНІХ ФАКТОРІВ. MEASURING AND COMPUTING DEVICES IN TECHNOLOGICAL PROCESSES, (1), 7–12. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2025-81-1>
6. INTEGRATION OF TECHNICAL SAW AND ARTICLE INTELLIGENCE SYSTEMS FOR AUTOMATED IMAGE RECOGNITION IN ENERGY SUPPLEMENTS (<https://scholar.google.com.ua/scholar?oi=bibs&cluster=14671619364537646885&btnI=1&hl=uk>)
7. М. Юхимчук, В. Лесько - Міжнародна науково-технічна конференція з оптико-електронних інформаційних технологій "ФОТОНІКА – ODS 2025" , 2025 (https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/ods/ods_2025/paper/view/23067)https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/ods/ods_2025/paper/view/23067

Глуценко Ілля Віталійович – студент групи ІЕСМ-23Б, факультет електротехніки та електромеханіки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: ilya123456789glushenko2005@gmail.com

Лесько Валадислав Олександрович – кандидат технічних наук , доцент кафедри електричних станцій та систем , Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: leskovlad@ukr.net .

Юхимчук Марія Сергіївна - д. т. наук , професор кафедри комп'ютерних систем управління, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: umcmasha@gmail.com .

Климчук Олександр Валерійович - аспіранта кафедри електричних станцій і систем, e-mail: aleksandr.klymchuk@gmail.com

Науковий керівник : Лесько Валадислав Олександрович , кандидат технічних наук , доцент кафедри електричних станцій та систем , Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: leskovlad@ukr.net .

Юхимчук Марія Сергіївна , д. т. наук , професор кафедри комп'ютерних систем управління, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: umcmasha@gmail.com .

Glushchenko Ilya Vitaliiovich. - student of group 1ESM-23B, Faculty of Electrical Engineering and Electromechanics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: ilya123456789glushenko2005@gmail.com

Lesko Valadyslav Oleksandrovich - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Power Plants and Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: leskovlad@ukr.net.

Yukhymchuk Mariia S., Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Computer Control Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: umcmasha@gmail.com.

Klymchuk Oleksandr Valeriiovych — postgraduate student of the Department of Electrical Stations and Systems, e-mail: aleksandr.klymchuk@gmail.com

Supervisor: Lesko Valadyslav ., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Power Plants and Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: leskovlad@ukr.net.

Yukhymchuk Mariia Serhiivna, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Computer Control Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: umcmasha@gmail.com.

Klymchuk Oleksandr Valeriiovych — postgraduate student of the Department of Electrical Stations and Systems, e-mail: aleksandr.klymchuk@gmail.com

АНАЛІЗ МОДЕЛІ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ВИТРАТАМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В ЕЛЕКТРОРОЗПОДІЛЬЧІЙ СИСТЕМІ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

В роботі запропонована концептуальна модель, яка описує процес оперативного управління технологічними витратами електричної енергії в електророзподільчій системі, як процес регулярного покращення (оптимізації) функціонування електророзподільчої системи. Застосування даної моделі управління дозволяє у подальшому оптимізувати та автоматизувати процес управління технологічними витратами електроенергії в електророзподільчій системі, з метою досягнення вищих рівнів енергоефективності її функціонування. Показано, що ця модель може бути застосована для вирішення завдань не тільки стратегічного і тактичного управління (в розрізі років та місяців) при формуванні планів розвитку та поточної експлуатації систем розподілу, але і оперативної оптимізації технологічними витратами електроенергії в темпі процесу.

Ключові слова: концептуальна модель, технологічні витрати електричної енергії, електророзподільча система, управління технологічними витратами електроенергії.

Abstract

The paper proposes a conceptual model that describes the process of operational management of technological costs of electricity in the power distribution system as a process of regular improvement (optimization) of the functioning of the power distribution system. The application of this management model allows further optimization and automation of the process of management of technological costs of electricity in the power distribution system, in order to achieve higher levels of energy efficiency of its functioning. It is shown that this model can be used to solve the problems of not only strategic and tactical management (in terms of years and months) when forming development plans and current operation of distribution systems, but also operational optimization of technological costs of electricity at the pace of the process.

Keywords: onceptual model, technological electricity consumption, electricity distribution system, management of technological electricity consumption.

Вступ

Процес реалізації комплексу робіт, направлених на зниження технологічних витрат електричної енергії (ТВЕ) в розподільчих електричних мережах систем розподілу, по своїй суті, є процесом управління ТВЕ. Він передбачає не лише визначення та аналіз ТВЕ [1], локалізацію непродуктивних ТВЕ і виявлення їх причин, але й планування, організацію та контроль за виконанням організаційно-технічних заходів (ОТЗ) зі зниження ТВЕ, а також аналіз і оцінювання ефективності цих заходів [2].

Не зважаючи на широкий спектр практичних рекомендацій щодо розробки та реалізації ОТЗ зі зниження ТВЕ, сам процес управління ТВЕ в системах розподілу електроенергії на даний час в значній мірі не описано та не формалізовано.

Тому, виникає необхідність у розробці концептуальної моделі процесу управління ТВЕ, що здійснюється по відношенню до системи розподілу електричної енергії (або ж електророзподільчої системи ЕРС) в цілому, включно із розподільчими електричними мережами 150-0,38 кВ [3], яка є об'єктом управління [4].

Метою роботи є концептуальна декомпозиція, опис та формалізація процесу управління ЕРС за критерієм зниження ТВЕ, яка дозволить у подальшому оптимізувати та автоматизувати процес управління технологічними витратами електроенергії в ЕРС, з метою досягнення вищих рівнів енергоефективності її функціонування.

Результати дослідження

Оперативні, тактичні, а особливо стратегічні рішення, які приймаються керівництвом оператора

системи розподілу (ОСР) щодо реалізації організаційно-технічних заходів (ОТЗ) зі зниження технологічних витрат електроенергії (ТВЕ) потребують залучення значних матеріальних та організаційних ресурсів на всіх стадіях їх реалізації. Підтримка прийняття рішень щодо вибору об'єктів зниження ТВЕ та ефективної реалізації ОТЗ потребує в свою чергу аналізу значного обсягу розрізної інформації щодо: поточного та прогнозованого стану розподільчих електричних мереж і системи обліку електроенергії, системи потоків і балансів електроенергії, а також зовнішніх факторів, які впливають на ефективність розподілу електроенергії.

Управління ТВЕ потребує також нагромадження та експертного аналізу інформації (даних) щодо рекомендованих та реалізованих ОТЗ на об'єктах розподілу електроенергії, їх ефективності та (що особливо важливо) доцільності застосування в подальшому. Не зважаючи на наявність значної кількості практичних методичних рекомендацій щодо застосування ОТЗ із зниження ТВЕ, аналіз їх процесу розробки та реалізації як системи управління ТВЕ – не проводився. Підвищення ефективності виконання всіх видів ОТЗ (особливо ресурсозатратних, пов'язаних із розвитком і модернізацією електричних мереж), - потребує переходу від узагальненого (за звітними витратами по всіх мережах ОСР в цілому) до структурованого адресного управління ТВЕ із пофрагментним, пооб'єктним та поелементним контролем за технологічними витратами електроенергії в розподільчих мережах.

У найбільш загальному вигляді система розподілу електроенергії [3], або ж електророзподільча система (ЕРС) як об'єкт управління технологічними витратами електроенергії (ТВЕ) може бути представлена шляхом декомпозиції за ознакою власності розподільчих мереж та приєднаних до них електроустановок трьома основними складовими частинами, які включають: власне розподільчі мережі оператора системи розподілу (ОСР) (**D**) та приєднані до них електричні мережі та електроустановки споживачів (**J**), а також приєднані електроустановки генерації електроенергії виробників та електричні мережі оператора системи передачі (ОСП) і сусідніх ОСР (**Q**) (рис.1).

Для відображення ЕРС як об'єкта управління ТВЕ вищезазначені складові, що представляють фізичні процеси перетікання електроенергії в розподільчих мережах та їх організаційне і документальне забезпечення, - доповнюються процесом визначення ТВЕ (**R**), який за своєю природою є виключно інформаційним процесом.

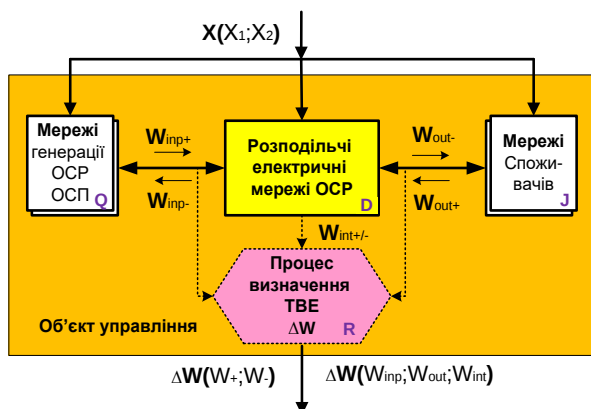


Рис. 1. Спрощена модель ЕРС, як об'єкта управління технологічними витратами електроенергії

Визначення величини ТВЕ (ΔW , кВт*год) як основного параметра енергоефективності функціонування ЕРС, - передбачає опрацювання вимірних обсягів перетікання електроенергії W в точках обліку на об'єктах розподілу електроенергії, приведення їх до меж балансової належності мереж чи об'єктів розподілу. Розподільча мережа ОСР підлягає управляючим впливам X_1 зі сторони системи управління та X_2 зі сторони зовнішнього середовища. Необхідний для контролю за об'єктом управління розрахунок ТВЕ (який є частиною процедури визначення ТВЕ **R**) здійснюється шляхом агрегування та визначення різниці між потоками відпуску (у мережу) W_+ і віддачі (з мережі) W_- електроенергії як для розподільчих мереж ОСР в цілому, так і пофрагментно.

Більш повна інформація необхідна для реалізації процесу управління ТВЕ в розподільчих електричних мережах 150-0,38 кВ представлена за допомогою узагальненої концептуальної моделі ЕРС, яка повинна забезпечити можливість побудови і експлуатації системи управління ТВЕ [4].

Концептуальна модель ЕРС охоплює всі складові розподільчих електричних мереж та аспекти процесу розподілу електроенергії [3], включаючи електроустановки розподільчих електричних мереж (**U**), що складаються із засобів розподілу (лінії електропередачі, силові трансформатори, секції шин, вузли

з'єднань, тощо), комутування (комутаційні апарати, - вимикачі, роз'єднувачі, тощо) та регулювання потоків електроенергії (компенсуючі установки, вольтододавальні трансформатори, РПН, БСК, ДГК, тощо), а також самі потоки активної і реактивної електроенергії W , які перетікають через розподільчі мережі (F) та засоби диспетчерсько-технологічного управління електричними мережами і потоками електроенергії, регулювання і захисту (C).

Висновки

Отримана концептуальна модель процесу управління ТВЕ в розподільчих мережах 150-0,38кВ ЕРС – розроблена шляхом узагальнення і розвитку опису предметної області (управління ТВЕ) на основі досвіду виконання робіт із зниження ТВЕ в розподільчих мережах оператора системи розподілу АТ “Хмельницькобленерго” [4].

Дана модель описує процес управління ТВЕ в ЕРС, як процес регулярного покращення (оптимізації) функціонування ЕРС через підвищення її енергоефективності. Крім того, запропонована модель може бути застосована для вирішення завдань не тільки стратегічного і тактичного управління (в розрізі років та місяців) при формуванні планів розвитку та поточної експлуатації систем розподілу (ЕРС), але і оперативного управління (оптимізації) ТВЕ в темпі процесу експлуатації ЕРС, - за умови розробки відповідного програмного забезпечення (включаючи прогнозування режимів експлуатації ЕРС та впливів зовнішнього середовища) та його реалізації в середовищі автоматизованих систем управління та диспетчерсько-технологічного керування ЕРС.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. ГНД 34.09.104-2003 Методика складання структури балансу електроенергії в електричних мережах 0,38-150 кВ, аналізу його складових і нормування технологічних витрат електроенергії. Зміни (Наказ Міністерства палива та енергетики України від 29.11.2021 № 307).

2. СОУ-Н ЕЕ 40.1-00100227-96:2014 “Методичні рекомендації з аналізу технологічних витрат електричної енергії та вибору заходів щодо їх зниження”(Наказ Міністерства енергетики та вугільної промисловості України від 24.02.2014 № 217).

2. Кодекс систем розподілу Затверджений Постановою Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг (НКРЕКП) № 310 від 14.03.2018 / Із змінами, внесеними згідно з Постановами НКРЕКП № 2595 від 03.12.2019 та № 1209 від 24.06.2020 / <http://zakon.rada.gov.ua/lawO/Ohov/v0310874-18#Text>.

4. Луців, П. Д., і Н. В. Остра. «Формування концептуальної моделі управління технологічними витратами електроенергії в розподільчих мережах 150–0,38 кВ». Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність, вип. 1 (8), Липень 2024, с. 64-72, doi:10.20998/2224-0349.2024.01.17.

Лежнюк Петро Дем'янович — докт. техн. наук, проф., професор кафедри електричних станцій та систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця.

Луців Петро Денисович (Petro Lutsiv) — аспірант, факультет електроенергетики та електромеханіки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця / Директор департаменту розвитку та координації міжнародних проектів АТ “Хмельницькобленерго”, м. Хмельницький.

Остра Наталя Вікторівна — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електричних станцій та систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: natalyaostro@ukr.net.

Lezhnyuk Petro D. — Dr. tech. Sciences, Prof., Professor of the Department of Power Plants and Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsya.

Lutsiv Petro D — Postgraduate student, Faculty of Electrical Power Engineering and Electromechanics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia / Director of the Department of Development and Coordination of International Projects of JSC “Khmelnytskoblenargo”, Khmelnytskyi.

OSTRA NATALIA V. — PHD, AS. PROFESSOR, ASSOCIATE PROFESSOR OF THE DEPARTMENT OF POWER PLANTS AND SYSTEMS, VINNYTSIA NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY, VINNYTSIA, E-MAIL: NATALYAOISTRA@UKR.NET.

КОНЦЕПТУАЛЬНА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ РОЗПОДІЛУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ, ЯК ОБ'ЄКТА УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ВТРАТАМИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Розроблено концептуальну модель, яка представляє систему розподілу електричної енергії, як об'єкт управління з метою зниження технологічних втрат електричної енергії в розподільчих електричних мережах напругою 150-0,38 кВ.

Ключові слова: електрична енергія, втрати електроенергії, система розподілу електричної енергії, технологічні втрати електроенергії, управління технологічними втратами електричної енергії, розподільчі електричні мережі.

Abstract

A conceptual model has been developed that represents the electrical energy distribution system as a control object with the aim of reducing technological losses of electrical energy in electrical distribution networks with a voltage of 150-0.38 kV.

Keywords: electric energy, electricity losses, electric energy distribution system, technological losses of electric energy, management of technological losses of electric energy, electric distribution networks.

Вступ

Формування концептуальної моделі системи розподілу електричної енергії (РЕЕ), як об'єкта управління за критерієм зниження (мінімізації) технологічних втрат електроенергії (ТВЕ) в електричних мережах 150-0,38кВ передбачає представлення всіх складових (матеріальних та інформаційних об'єктів) системи РЕЕ та факторів зовнішнього впливу, від яких залежать ТВЕ [3]. Концептуальна модель системи РЕЕ повинна забезпечити можливість побудови системи управління ТВЕ [5], яка охоплює всі аспекти процесу розподілу електроенергії [1, 2], включаючи взаємодію із суміжними до неї системами [4].

Метою роботи є концептуальна декомпозиція системи розподілу електричної енергії на основні складові, яка дозволить у подальшому формалізувати та реалізувати процес адаптивного керування технологічними втратами та витратами системи РЕЕ в цілому, - для досягнення вищих рівнів енергоефективності функціонування системи розподілу.

Результати дослідження

ТВЕ в системі РЕЕ залежать від складу та структури розподільчих електричних мереж, їх технічного стану а також величини потоків електроенергії що розподіляється від генеруючих джерел до численних струмоприймачів споживачів. Технологічні втрати електричної енергії в розподільчих електричних мережах спричинені не лише перетіканням струму в електричній мережі та вимірювальними похибками приладів обліку [2, 3], але і недообліком електроенергії, який спричинений несанкціонованим відбором електроенергії та недосконалістю діючих систем обліку. Окремо розглядаються витрати електричної енергії на власні (технологічні) потреби підстанцій і плавлення ожеledі [3] та господарські потреби оператора системи розподілу (ОСР). Узагальнена концептуальна модель системи розподілу електричної енергії, як об'єкта управління ТВЕ в електричних мережах 150-0,38 кВ представлена на рис. 1.

Система розподілу електроенергії (D) функціонує у тісній взаємодії із зовнішніми по відношенню до неї системами, у яких виробляється, накопичується, транспортується та споживається електрична енергія. При цьому перетікання електроенергії між даною системою та кожною із суміжних систем може бути взаємним. Усі системи, сусідні до системи розподілу електроенергії, із яких надходить та у які віддається електрична енергія в електричній мережі системи розділяються умовно на дві категорії в залежності від переважаючого для них напрямку перетікання електроенергії, а саме: системи відпуску та системи відбору (віддачі) електроенергії.

До систем відпуску електроенергії (Е) відносяться сусідні до системи РЕЕ, електроенергія із яких переважно надходить в мережі електророзподільчої системи. Серед них: системи передачі та виробництва електроенергії (СПЕ, СВЕ), інші системи розподілу електроенергії сусідніх операторів систем розподілу (ОСР).

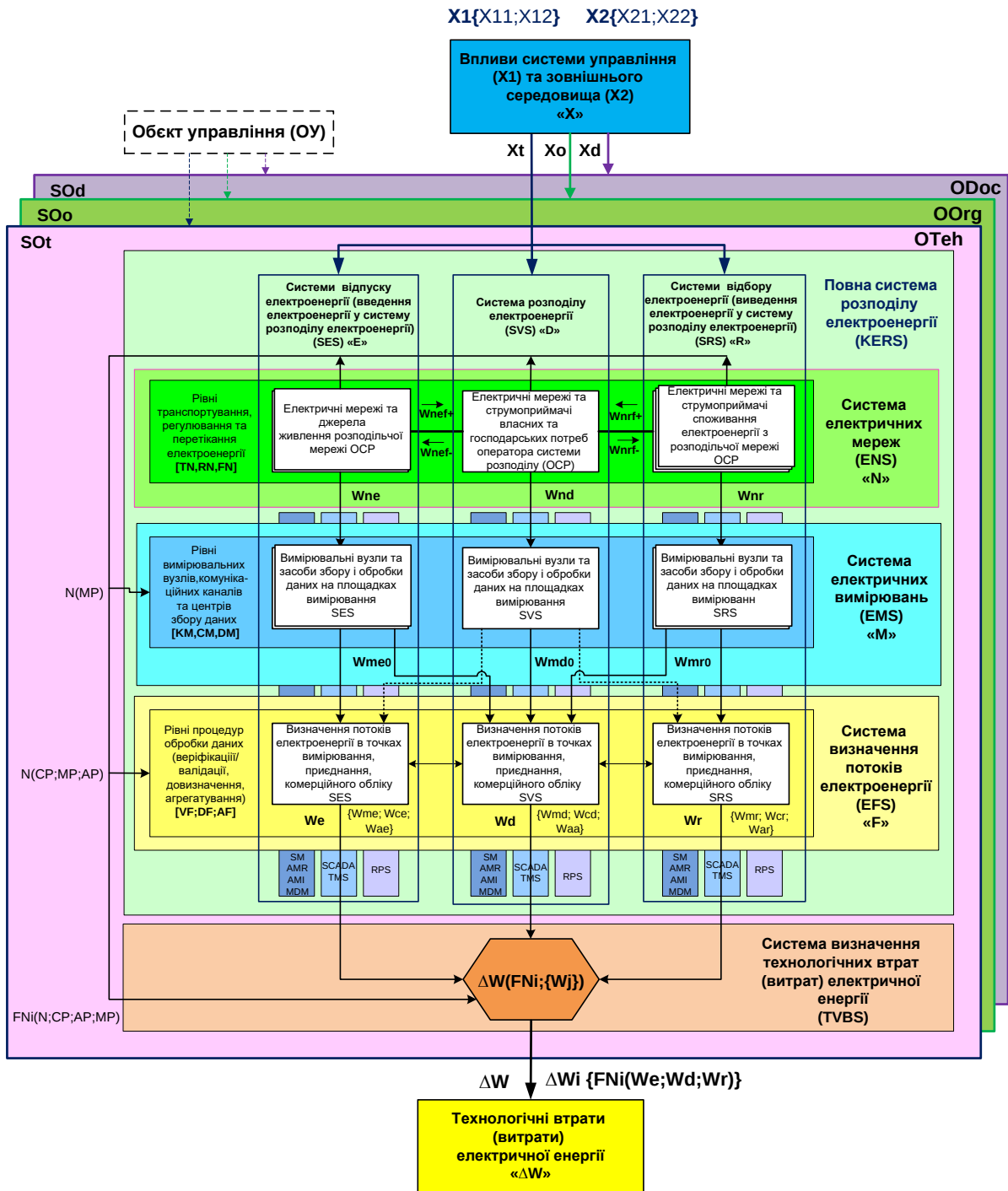


Рис. 1. Спрощена модель системи розподілу електричної енергії, як об'єкта управління технологічними втратами електроенергії

Висновки

Отже, запропонована концептуальна модель системи розподілу електроенергії була розроблена шляхом уточнення і розвитку опису предметної області, яка охоплює технічні, організаційні та документальні аспекти функціонування системи розподілу електричної енергії (ЕРС) [4, 5]. Концептуальна модель відображає не лише матеріальні об'єкти (електричні мережі, потоки електричної енергії та засоби вимірювання та керування режимами розподілу електричної енергії), але і інформаційні об'єкти (первинні та оброблені дані вимірювань, алгоритми і процедури та результати їх реалізації). Інформаційні об'єкти призначені для визначення величин та напрямків потоків електричної енергії в точках вимірювання, точках розподілу та точках комерційного обліку, а також для визначення пофрагментних та загальних обсягів технологічних втрат і витрат електричної енергії у розподільчих електричних мережах.

Концептуальна модель охоплює усі системи, які є сусідніми до системи РЕЕ та передбачає врахування впливів зовнішнього середовища, що створює передумови до прогнозування величини зовнішніх потоків електричної енергії (незалежних від даної системи), які суттєво впливають на ТВЕ.

Передбачена у концептуальній моделі декомпозиція розподільчої електричної мережі на фрагменти дозволить оптимізувати процес управління даною системою РЕЕ шляхом локалізації непродуктивних технологічних втрат та витрат електричної енергії в системі розподілу електричної енергії та ефективної реалізації організаційно-технічних заходів направлених на зниження ТВЕ.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Кодекс систем розподілу . Затверджений Постановою Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг (НКРЕКП) № 310 від 14.03.2018 / Із змінами, внесеними згідно з Постановами НКРЕКП № 2595 від 03.12.2019 та № 1209 від 24.06.2020 / <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0310874-18#Text>
2. Кодексу комерційного обліку електричної енергії. Затверджений Постановою Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг (НКРЕКП) № 311 від 14.03.2018 / Із змінами, внесеними згідно з Постановою НКРЕКП № 716 від 20.03.2020 / <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0311874-18#Text>
3. Методика складання структури балансу електроенергії в електричних мережах 0.38-150 кВ, аналізу його складових і нормування технологічних витрат електроенергії. ГНД 34.09.104-2003— К.: ГРІФРЕ, 2004. – 164 с.
4. Луців П.Д. Організація робіт із зменшення технологічних витрат електроенергії у ВАТ ЕК "Хмельницькобленерго"// Щомісячний науково-технічний аналітичний журнал "Новини енергетики" №6 2005. - С.46-51.
5. Луців П.Д. Управління технологічними витратами електроенергії в енергопостачальній компанії ВАТ ЕК "Хмельницькобленерго"/ О.Л. Шпак., П.Д. Луців / Электрические сети и системы. Спецвыпуск 2010. - С. 32-40.

Лежнюк Петро Дем'янович — докт. техн. наук, проф., професор кафедри електричних станцій та систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця.

Луців Петро Денисович — аспірант, факультет електроенергетики та електромеханіки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця / Директор департаменту розвитку та координації міжнародних проектів АТ "Хмельницькобленерго", м. Хмельницький.

Остра Наталя Вікторівна — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електричних станцій та систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: natalyaostro@ukr.net.

Lezhnyuk Petro D. — Dr. tech. Sciences, Prof., Professor of the Department of Power Plants and Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.

Lutsiv Petro D — Postgraduate student, Faculty of Electrical Power Engineering and Electromechanics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia / Director of the Department of Development and Coordination of International Projects of JSC "Khmelnyskoblenenergo", Khmelnytskyi.

Ostra Natalia V. — PhD, As. professor, Associate Professor of the Department of Power Plants and Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: natalyaostro@ukr.net.

СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПОПИТОМ: АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВПРОВАДЖЕННЯ В ЛОКАЛЬНИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ УКРАЇНИ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У дослідженні проаналізовано сучасний стан та перспективи розвитку технологій керування попитом, а також досліджено вплив таких проривних технологій, як штучний інтелект та інтернет речей. Особливу увагу приділено аналізу потенціалу та розробці рекомендацій щодо впровадження сучасних систем керування попитом у локальних електроенергетичних системах України з урахуванням викликів, пов'язаних зі значними пошкодженнями генеруючої інфраструктури.

Ключові слова: системи керування попитом, реагування на попит, енергоефективність, розумні мережі, агрегатор, активний споживач, відновлювані джерела енергії (ВДЕ), штучний інтелект (ШІ), інтернет речей, локальні електроенергетичні системи.

Abstract

The study analyzes the current state and development prospects of demand-side management technologies, and also explores the impact of such breakthrough technologies as Artificial Intelligence and the Internet of Things. Particular attention is paid to the analysis of the potential and the development of recommendations for the implementation of modern DSM systems in the local power systems of Ukraine, taking into account the challenges associated with significant damage to the generation infrastructure.

Keywords: demand-side management (DSM), demand response (DR), energy efficiency, smart grid, aggregator, active consumer, prosumer, renewable energy sources (RES), artificial intelligence (AI), internet of things (IoT), local power systems.

Вступ

Зростання частки ВДЕ, таких як сонячні та вітрові станції, створює безпрецедентні виклики для операторів енергосистем. Їхня стохастична та непередбачувана генерація вимагає нових підходів до забезпечення балансу між виробництвом та споживанням у реальному часі. Для компенсації цих коливань необхідний перехід до нової парадигми, де споживачі стають не пасивними об'єктами, а активними й повноправними учасниками ринку, свідомо керуючи своїм навантаженням через системи керування попитом.

Для України, в умовах значних пошкоджень та руйнувань критичної енергетичної інфраструктури, концепція системи керування попитом набуває особливого, стратегічного значення. Вона перестає бути лише інструментом для економічної оптимізації та перетворюється на критично важливий механізм для виживання системи та гарантування національної енергетичної безпеки. Впровадження механізмів керування попитом дозволяє не лише знизити навантаження в пікові години, але й підвищити гнучкість системи, що є ключовим фактором для інтеграції більших обсягів ВДЕ в майбутньому [1].

Основна частина

Розвиток систем керування попитом нерозривно пов'язаний із комплексною цифровою трансформацією енергетичних мереж. Фундаментом для цієї модернізації є концепція розумних мереж

(Smart Grids), яка забезпечує двосторонній обмін даними та керуючими сигналами між усіма учасниками ринку. Ключовим елементом цієї інфраструктури на рівні споживача є вдосконалена інфраструктура обліку (Advanced Metering Infrastructure, AMI), що складається з інтелектуальних лічильників, мереж зв'язку та систем керування даними. AMI дозволяє збирати дані про споживання з високою частотою, що є необхідною умовою для реалізації складних програм реагування на попит [1,2].

Якщо Smart Grid та AMI є "нервовою системою" систем керування попитом, то штучний інтелект (ШІ) та машинне навчання стають її "мозком". Алгоритми ШІ використовуються для високоточного прогнозування споживання та генерації ВДЕ, оптимізації роботи розподілених ресурсів (наприклад, систем накопичення енергії) та автоматизації керування навантаженням в інтелектуальних будівлях, що дозволяє значно знизити енергоспоживання без шкоди для комфорту.

Технології Інтернету речей (IoT) у поєднанні з мережами 5G створюють фізичну основу для точкового моніторингу та керування мільйонами "розумних" пристроїв, перетворюючи їх на гнучкі ресурси, якими можна керувати в режимі реального часу. Це уможливлює реалізацію передових концепцій, таких як точне керування навантаженням (precise load control) та граничні обчислення (edge computing) [3].

Програми реагування на попит є основним інструментом активного керування і класифікуються на дві великі групи:

1. Програми, що базуються на ціні (Price-Based Programs): споживачі добровільно змінюють своє споживання у відповідь на динамічні тарифи, такі як тарифи, диференційовані за часом доби (Time-of-Use, ToU), або ціноутворення в реальному часі (Real-Time Pricing, RTP).
2. Програми, що базуються на стимулах (Incentive-Based Programs): споживачі отримують пряму фінансову винагороду за гарантоване зниження навантаження на вимогу оператора. До них належать програми прямого керування навантаженням (Direct Load Control, DLC) та тарифи з переривчастим навантаженням (Interruptible Rates) [4,5,6].

Порівняльний аналіз типів програм реагування на попит наведено в таблиці 1.

Таблиця 1. Порівняльний аналіз типів програм реагування на попит

Параметр	Програми на основі ціни (напр., RTP, ToU)	Програми на основі стимулів (напр., DLC, обмежені тарифи)
Механізм	Споживач реагує на зміну вартості електроенергії в часі.	Споживач отримує пряму виплату/стимул за підтверджене зниження навантаження.
Роль споживача	Активна (вимагає прийняття рішень та/або автоматизації).	Більш пасивна (може бути автоматизована через пряме керування).
Контроль з боку оператора	Непрямий (вплив через цінові сигнали).	Прямий (оператор/агрегатор може безпосередньо керувати активами).
Прогнозованість реакції	Нижча (реакція споживача може бути варіативною).	Вища (зниження навантаження є більш гарантованим та верифікованим).

Для ефективного залучення потенціалу гнучкості від малих та середніх споживачів на ринку з'явився новий ключовий гравець - агрегатор. Він діє як посередник, що об'єднує гнучкість тисяч споживачів у значний віртуальний ресурс і пропонує його на ринках електроенергії (наприклад, ринку допоміжних послуг), де він конкурує з традиційними електростанціями. Розвиток ринку агрегації є ключовим фактором для розкриття всього потенціалу систем керування попитом.

Впровадження систем керування попитом в Україні може відбуватися через створення мікромереж для критичної інфраструктури та локальних енергетичних спільнот, що сприятиме підвищенню стійкості та надійності енергопостачання на місцевому рівні [7,8].

Висновок

На основі проведеного аналізу, система керування попитом є стратегічним для України в умовах дефіциту генеруючої потужності, спричиненого військовою агресією. Децентралізована архітектура системи керування попитом підвищує стійкість енергосистеми до цілеспрямованих атак, перетворюючи її на елемент національної безпеки.

Процес повоєнної відбудови створює унікальні можливості для "технологічного стрибка" до гнучкої та децентралізованої енергетичної моделі, де система керування попитом відіграє значну роль. Успішна реалізація цього потенціалу вимагає створення ринкових механізмів для агрегаторів, запуску пілотних проєктів для відпрацювання технологій та інтеграції принципів енергетичної справедливості.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Panda, Subhasis, Sarthak Mohanty, Kumar Rout, and Binod Kumar Sahu. "A comprehensive review on demand side management and market design for renewable energy support and integration." *Energy Reports* 10 (листопад 2023): 2228–2250. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.09.049>.
2. Williams, Baxter, Daniel Bishop, Patricio Gallardo, and J. Geoffrey Chase. "Demand Side Management in Industrial, Commercial, and Residential Sectors: A Review of Constraints and Considerations." *Energies* 16, № 13 (липень 2023): 5155. <https://doi.org/10.3390/en16135155>.
3. Sa'ed, Jaser A., Zakariya Wari, Fadi Abughazaleh, Jafar Dawud, Salvatore Favuzza, and Gaetano Zizzo. "Effect of Demand Side Management on the Operation of PV-Integrated Distribution Systems." *Appl. Sci.* 10, № 21 (жовтень 2020): 7551. <https://doi.org/10.3390/app10217551>.
4. Esparza, Astrid, Maude Blondin, and João Pedro F. Trovão. "A Review of Optimization Strategies for Energy Management in Microgrids." *Energies* 18, № 13 (червень 2025): 3245. <https://doi.org/10.3390/en18133245>.
5. Oladapo, Bankole I., Matthew A. Olawumi, and Francis T. Omigbodun. "Machine Learning for Optimising Renewable Energy and Grid Efficiency." *Atmosphere* 15, № 10 (жовтень 2024): 1250. <https://doi.org/10.3390/atmos15101250>.
6. Bertolini, Marina, and Gregorio Morosinotto. "Business Models for Energy Community in the Aggregator Perspective: State of the Art and Research Gaps." *Energies* 16, № 11 (червень 2023): 4487. <https://doi.org/10.3390/en16114487>.
7. Božičević Vrhovčak, Maja, and Bruno Malbašić. "Unlocking the Value of Aggregated Demand Response: A Survey of European Electricity Markets." *Energies* 16, № 17 (вересень 2023): 6386. <https://doi.org/10.3390/en16176386>.
8. Al-Mashhadani, Sarmad Waleed Taha, and Sefer Kurnaz. "A Novel Function of a Research Process Based on a Power Internet of Things Architecture Intended for Smart Grid Demand Schemes." *Appl. Sci.* 14, № 13 (липень 2024): 5799. <https://doi.org/10.3390/app14135799>.

Насадюк Руслан Миколайович — аспірант кафедри електричних станцій та систем, факультет електроенергетики та електромеханіки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: nalsur507@gmail.com.

Комар Вячеслав Олександрович — д.т.н., професор, завідувач кафедри електричних станцій та систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: kvo1976@ukr.net.

Ruslan NASADIUK — PhD student at the Department of Electrical Power Stations and Systems, Faculty of Electrical Power Engineering and Electromechanics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: nalsur507@gmail.com.

Viacheslav KOMAR — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Electric Power Stations and Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: kvo1976@ukr.net.

**ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ SMART GRID ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ
РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ В УМОВАХ ВОЄННОГО ЧАСУ****Вінницький Національний Технічний Університет****Анотація**

Воєнний стан в Україні створив критичні виклики для енергетичної інфраструктури, що вимагає впровадження технологій Smart Grid для забезпечення стійкості та надійності електропостачання. Робота присвячена аналізу можливостей використання інтелектуальних мереж, мікромереж та розподілених енергоресурсів для підвищення живучості енергосистеми в умовах цілеспрямованих атак на критичну інфраструктуру. Розглянуто технічні рішення для локальної автономізації споживачів та методи кіберзахисту.

Ключові слова: *Smart Grid, мікромережі, стійкість енергосистеми, кіберзахист, розподілена генерація.*

Abstract

Martial law in Ukraine has created critical challenges for the energy infrastructure, requiring the implementation of Smart Grid technologies to ensure the stability and reliability of electricity supply. The work is devoted to the analysis of the possibilities of using smart grids, microgrids and distributed energy resources to increase the survivability of the energy system in the face of targeted attacks on critical infrastructure. Technical solutions for local consumer autonomy and methods of cyber protection are considered.

Keywords: *Smart Grid, microgrids, energy system stability, cyber protection, distributed generation.*

Вступ

Енергетична система України зазнає безпрецедентних викликів внаслідок систематичних ракетних та дронівих атак на критичну інфраструктуру. За даними Міжнародного енергетичного агентства, станом на 2024 рік пошкоджено близько 80% генеруючих потужностей країни [4]. Традиційна централізована модель електропостачання виявилася вразливою до цілеспрямованих ударів по ключових об'єктах генерації та передачі, що призводить до тривалих відключень електроенергії та загрожує національній безпеці.

Сучасні технології Smart Grid пропонують альтернативний підхід до організації енергосистеми, заснований на децентралізації, інтелектуалізації та підвищенні стійкості мережі. Концепція мікромереж, здатних функціонувати автономно від основної мережі, набуває особливого значення в умовах воєнного часу, коли ймовірність пошкодження магістральних ліній електропередачі є високою [1].

Метою дослідження є аналіз можливостей застосування технологій Smart Grid для підвищення стійкості електричних мереж в умовах воєнних дій та розробка рекомендацій щодо оптимізації режимів роботи енергосистеми. Ключові завдання включають: визначення загроз для енергетичної інфраструктури в умовах воєнного стану, аналіз архітектури мікромереж для

критично важливих об'єктів, дослідження механізмів кіберзахисту інтелектуальних енергосистем та оцінку ефективності розподілених енергоресурсів для забезпечення локальної енергонезалежності.

Результати дослідження

Аналіз воєнних загроз для енергетичної інфраструктури показує, що основними векторами атак є фізичне пошкодження генеруючих потужностей, підстанцій та ліній електропередачі, а також кіберпростір. Централізована структура електропостачання створює критичні точки відмови, порушення яких призводить до каскадних аварій та тривалих відключень споживачів [4]. Традиційна модель забезпечення надійності через резервування N-1 виявляється недостатньою, коли атаки носять цілеспрямований та масовий характер.

Концепція Defense Energy Architecture, запропонована для військових об'єктів США, передбачає створення автономних мікромереж на базі малих модульних реакторів та відновлюваних джерел енергії [2]. Такий підхід забезпечує чотири критичні властивості: безперервне енергопостачання, незалежність від основної мережі, захист від фізичних та кіберзагроз, можливість експедиційного розгортання. Для українських умов особливо актуальним є застосування мікромереж на об'єктах критичної інфраструктури - лікарнях, центрах управління, комунікаційних вузлах та військових базах.

Технічна архітектура стійкої мікромережі включає три основні компоненти: розподілені джерела генерації, систему накопичення енергії та інтелектуальну систему управління. Найбільш перспективною є гібридна конфігурація, що поєднує відновлювані джерела енергії (сонячні панелі, вітрогенератори) з традиційними генераторами та акумуляторними системами. Така конфігурація забезпечує базове навантаження та компенсує мінливість відновлюваної генерації [1]. Критично важливою є здатність мікромережі до "островного" режиму роботи - автономного функціонування при відключенні від основної мережі.

Система управління мікромережею повинна забезпечувати балансування генерації та споживання в реальному часі, пріоритизацію навантажень та координацію роботи різних джерел енергії. Ієрархічна структура керування включає первинний рівень (локальні контролери генераторів та навантажень), вторинний рівень (координація потоків потужності та підтримка частоти і напруги) та третинний рівень (оптимізація економічних показників та взаємодія з основною мережею). В умовах воєнного часу особливого значення набуває автономність первинного та вторинного рівнів, здатних підтримувати роботу мікромережі навіть при втраті зв'язку з центральною системою диспетчеризації.

Методологія оцінки стійкості мікромереж базується на концепції ризику, що визначається як добуток ймовірності загрози, ймовірності вразливості та впливу від реалізації загрози. Для фізичних загроз оцінюється ймовірність ураження обладнання залежно від типу зброї та засобів захисту. Наприклад, для мікромережі на узбережжі Флориди ризик від урагану оцінено як $9 \times 7 \times 9 = 567$ балів через високу ймовірність затоплення наземного обладнання. В українських умовах необхідно враховувати специфічні загрози - ймовірність ракетних ударів, використання дронів-камікадзе, диверсійних дій.

Стратегії підвищення стійкості поділяються на превентивні (зміцнення інфраструктури) та оперативні (алгоритми управління в надзвичайних ситуаціях). До превентивних заходів належать: розміщення критичного обладнання у захищених приміщеннях, підвищення кліматичної стійкості компонентів, створення запасів палива та запчастин, забезпечення резервних каналів зв'язку. Оперативні стратегії включають проактивне управління

навантаженням при отриманні попередження про атаку, автоматичне відключення некритичних споживачів, реконфігурацію мережі для ізоляції пошкоджених ділянок, використання систем безперебійного живлення для пріоритетних навантажень [1].

Кіберзахист інтелектуальних енергосистем є критично важливим аспектом забезпечення стійкості. Досвід кібератак на українську енергосистему у 2015 та 2023 роках демонструє реальність загроз: порушення конфіденційності, цілісності та доступності даних SCADA-систем може призвести до несанкціонованого відключення споживачів, пошкодження обладнання через неправильні команди, дестабілізації мережі [1]. Модель оцінки кіберзагроз DREAD враховує п'ять параметрів: потенціал пошкодження, відтворюваність атаки, експлуатованість вразливості, кількість уражених користувачів та виявлюваність вразливості. Для прикладу, атака типу "відмова в обслуговуванні" через глушіння бездротових каналів зв'язку оцінюється ризиком 7.8 балів [1].

Технічні рішення для підвищення кіберстійкості включають: шифрування та автентифікацію всіх каналів передачі даних, сегментацію мереж з ізоляцією операційної технології від корпоративних мереж та Інтернету, використання захищених протоколів комунікації, впровадження систем виявлення вторгнень, регулярне оновлення програмного забезпечення та навчання персоналу. Особливого значення набуває резервування каналів зв'язку та забезпечення автономної роботи локальних контролерів при втраті зв'язку з центром управління.

Роль активних споживачів-виробників (prosumers) у забезпеченні стійкості мережі зростає з впровадженням розподіленої генерації [3]. Домогосподарства та підприємства з власними сонячними панелями, електромобілями та системами накопичення енергії можуть активно підтримувати баланс мережі через програми керування попитом. Для ефективної участі споживачів необхідні: доступ до даних про стан мережі в реальному часі, зрозумілі інтерфейси візуалізації енергетичної інформації, економічні стимули (динамічні тарифи, компенсації за надання послуг балансування), автоматизовані системи управління домашніми пристроями. Підвищення енергетичної обізнаності населення дозволяє не лише оптимізувати режими споживання, але й підвищити готовність до надзвичайних ситуацій через створення локальних запасів та розуміння алгоритмів відновлення електропостачання.

Висновки

Застосування технологій Smart Grid є необхідною умовою підвищення стійкості енергетичної системи України в умовах воєнного стану. Децентралізована архітектура на базі мікромереж забезпечує локальну енергонезалежність критично важливих об'єктів та знижує ризики каскадних аварій при пошкодженні магістральної інфраструктури. Інтеграція відновлюваних джерел енергії з традиційною генерацією та системами накопичення створює гнучку та резервовану систему електропостачання.

Практична реалізація стійких мікромереж вимагає комплексного підходу, що поєднує технічні рішення (захищене обладнання, резервовані канали зв'язку, інтелектуальні системи управління), організаційні заходи (підготовка персоналу, розробка процедур реагування на надзвичайні ситуації) та залучення активних споживачів через програми керування попитом. Особлива увага має приділятися кіберзахисту, оскільки зростаюча цифровізація енергосистеми створює нові вектори атак.

Пріоритетними напрямками впровадження технологій Smart Grid в Україні мають стати: створення автономних мікромереж для об'єктів критичної інфраструктури, модернізація систем

диспетчерського управління з підвищенням рівня кіберзахисту, стимулювання розвитку розподіленої генерації у домогосподарствах та підприємствах, розробка національних стандартів стійкості енергетичної інфраструктури. Подальші дослідження мають зосередитися на створенні математичних моделей оптимізації режимів роботи мікромереж в умовах часткового пошкодження обладнання та розробці методик швидкого відновлення електропостачання після масованих атак.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Mishra S., Anderson K., Miller B., Boyer K., Warren A. Microgrid Resilience: A holistic approach for assessing threats, identifying vulnerabilities, and designing corresponding mitigation strategies. Applied Energy, 2020.
- [2] Curtis S., Rocha P.D. Microgrids for the 21st Century: The Case for a Defense Energy Architecture. Joint Force Quarterly, 2024, 112.
- [3] Egert R., Daubert J., Marsh S., Mühlhäuser M. Exploring energy grid resilience: The impact of data, prosumer awareness, and action. Patterns, 2021, 2.
- [4] International Energy Agency. Ukraine's Energy Security and the Coming Winter, 2024. URL: <https://www.iea.org/reports/ukraines-energy-security-and-the-coming-winter>

Вихристюк Владислав Вячеславович — студент, факультет електроенергетики та електромеханіки, група ЕСМ-24м, Вінницький національний технічний університет, Вінниця.

Сікорська Олена Вікторівна – канд. техн. наук, ст.викладач кафедри електричних станцій і систем Вінницького національного технічного університету, м. Вінниця, e-mail: olenasikorska@ukr.net.

Vykhrystiuk Vladyslav Vyacheslavovych — student, Faculty of Electrical Power Engineering and Electromechanics, ESM-24m group, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.

Sikorska Olena V. - PhD, Senior Lecturer of the Department of Power Plants and Systems Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: olenasikorska@ukr.net.

СЕКЦІЯ 2

ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ СИСТЕМИ, ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ КОМПЛЕКСИ ТА КЕРУВАННЯ НИМИ

УДК.621.311

В.М. Слинко¹
М.О. Любич²

ПОСЛУГИ З ВИСОКОТОЧНОГО КОНТРОЛЮ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТА ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН

¹Інститут електродинаміки НАН України;

²Товариство з обмеженою відповідальністю «ЕТІН»

Анотація

пропонується унікальна послуга вимірювання метрологічних характеристик та оцінка працездатності вимірювальних засобів (приладів).

Ключові слова: метрологія, вимірювання, калібрування

Abstract

Offers a unique service of measuring metrological characteristics and assessing the performance of measuring instruments (devices).

Keywords: metrology, measurement, calibration

Вимірювання метрологічних характеристик та оцінка працездатності вимірювальних засобів.

Попередній експертний аналіз наявних засобів обліку та контролю якості електроенергії підприємства, промислового та/або побутового призначення на відповідність заявленим параметрам.

Наявне промислове обладнання: Прецизійний Еталон-калібратор електричної потужності FLUKE 6130A, Допоміжний Еталон-калібратор Fluke 6101A, Частотомір FLUKE PM 6690/062.

Діапазон випробувальних сигналів пристроїв дозволяє подавати на вхід електрорічильника необхідне значення вхідного сигналу з відповідною точністю та отримувати визначену метрологічну характеристику.

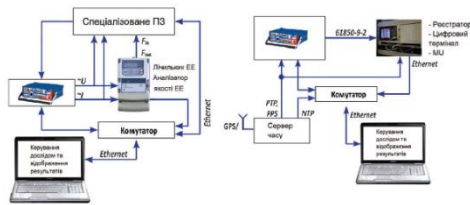
Наприклад **Еталон-калібратор Fluke 6101A** це прецизійний (високоточний) прилад, який використовується для калібрування вимірювальних пристроїв, що застосовуються для визначення параметрів якості електроенергії, що подається споживачам. Fluke 6101A дозволяє синтезувати джерела електроенергії з нестандартними характеристиками, в яких мають місце такі явища як: гармоніки напруги, проміжні гармоніки, гармоніки що коливаються, пульсації, падіння та підвищення напруги.

Для визначення метрологічної характеристики відхилень частоти використовуємо як джерело стабільної по частоті напруги калібратора FLUKE 6101A, як еталонний прилад для вимірювання частоти з точністю в межах $\pm 0,02$ Гц застосовується частотомір FLUKE PM 6690/062.

Високоточний набір для випробування реле та універсальний калібратор СМС 256plus.

СМС 256plus – це чудове рішення для застосувань, що вимагають над високої точності. Пристрій є не лише випробувальним набором для пристроїв РЗА усіх типів, але й універсальним інструментом калібрування.

Його висока точність дозволяє проводити тестування та калібрування широкого спектру вимірювальних приладів, включаючи: прилади для вимірювання якості електроенергії (PQ) класу А та S, лічильники енергії класу 0.2, вимірювальні перетворювачі та блоки вимірювання векторів (PMU).



Його унікальна точність та гнучкість роблять СМС 256plus ідеальним для виробників РЗА та вимірювального обладнання для досліджень та розробок, виробництва та типових випробувань.

Шість каналів струмового виходу та чотири канали напруги СМС 256plus мають плавне та незалежне регулювання амплітуди, фази та частоти. Усі виходи захищені.

Інтегрований мережевий інтерфейс підтримує комплексне тестування в середовищах **IEC 61850** за допомогою додаткового моделювання та підписки GOOSE, а також функції моделювання SV. Також можливо отримувати, оцінювати та реєструвати зв'язок клієнт/сервер IED SCADA відповідно до **IEC 61850**.

Випробувальний набір можна використовувати як портативний 10-канальний мультиметр, реєстратор перехідних процесів та трендів, аналізатор гармонійних сигналів тощо. Аналогові вимірювання необхідні для усунення несправностей під час введення в експлуатацію або технічного обслуговування пристроїв РЗА (наприклад, запис перехідних процесів під час комутаційних операцій або аналіз пусків трансформатора).

На випробувальному комплекті доступно до 12 незалежних каналів низькорівневих сигналів, які можна використовувати для тестування реле з нетрадиційними входами датчиків (наприклад, котушки Роговського) або для керування зовнішніми підсилювачами.

СМС 256plus розроблено для роботи з найпотужнішими програмними інструментами **OMICRON**. Користувачі можуть керувати випробувальним набором за допомогою ПК/ноутбука або планшета та підключатися через кабель Ethernet/USB або Wi-Fi (через додатковий міні-адаптер бездротового USB). Синхронізація часу відповідно до **IEEE 1588** можлива, наприклад, через **CMGPS 588**. GPS-керований годинник часу з вбудованою антеною працює як головний годинник протоколу точного часу (PTP) та оптимізований для використання на відкритому повітрі.

Слинько Володимир Мефодійович – канд. техн. наук, старший наук. співробітник, Інститут електродинаміки НАН України, Київ, e-mail: sl.vladimir2015@gmail.com

Любич Мар'ян Орестович – директор, Товариство з обмеженою відповідальністю «ЕТИН», Київ, e-mail: promielectro.etin@gmail.com

Slyenko Volodymyr M. - Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, e-mail: sl.vladimir2015@gmail.com

Ljubych Marian O. - Director, Limited Liability Company "ETIN", Kyiv, e-mail: promielectro.etin@gmail.com

ОПТИМІЗАЦІЯ МОНІТОРИНГУ ЗАПИЛЕНОСТІ ПОВЕРХНІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

Херсонський національний технічний університет

Проблема оцінки запиленості сонячних панелей ФЕС полягає у тому, що це унікальне рішення для кожної окремої станції і на сьогодні немає єдиного стандартного методу аналізу або математичної моделі, які можуть дати однозначну відповідь. У більшості випадків визначення забрудненості панелі має виключно практичний характер. Тому розробка універсального підходу щодо оцінки забрудненості сонячних панелей та необхідності їх чищення є актуальною задачею [1,2].

Метою роботи є дослідження впливу запиленості фотоелектричних модулів на генерацію електроенергії, розробка універсального алгоритму для аналізу періодичності та доцільності проведення чищення фотоелектричних модулів в умовах екстремальної запиленості.

У якості об'єкту дослідження було обрано ФЕС «Долинське». Станція спроектована і побудована на фермі та зернотоці, що спричиняє значну запиленість фотоелектричних модулів. На підставі експериментальних даних виміру сили струму на ФЕС після чищення протягом 39 діб було визначено втрати генерації окремо у сонячні та у хмарні дні. Шляхом обробки експериментальних даних отримано математичні апроксимації втрат генерації у вигляді раціональної функції окремо для сонячних $f_s(x)$ та хмарних $f_c(x)$ днів. Це дозволяє за величиною втрати генерації визначити кількість днів до наступного чищення фотоелектричних модулів у випадку сонячної та хмарної погоди відповідно. При цьому вважали максимально допустимим рівень втрат генерації 30%. Якщо втрати перевищують цей рівень, то треба проводити чищення фотоелектричних модулів [2].

При роботі ФЕС можливе чергування сонячних та хмарних днів, а також можливе самоочищення фотоелектричних модулів під час дощу, тому моніторинг втрат генерації треба проводити постійно. При цьому параметри $f_s(x)$ і $f_c(x)$ будуть змінюватися (збільшуватися або зменшуватися у залежності від стану запиленості фотоелектричних модулів). Так само будуть себе поводити і функції для визначення кількості днів до наступного чищення. Все це дозволяє автоматизувати процес моніторингу стану запиленості фотоелектричних модулів. В роботі розроблено відповідний алгоритм. Оскільки отримана функція втрат генерації повинна бути сезонною, на підставі експериментальних даних конкретної ФЕС отримано вигляд функції втрат та числові значення коефіцієнтів апроксимації для кожної пори року.

Запропонований алгоритм проведення моніторингу стану запиленості ФЕС є універсальним і придатний для застосування на будь-якій промисловій сонячній електростанції. Реалізація цього алгоритму у машинних кодах дозволить створити автоматизовану систему контролю стану запиленості та керування засобами миття фотоелектричних модулів.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Нестеренко Б.Б., Степанчиков Д.М. Дослідження генерації промислових фотоелектричних станцій у різних регіонах України. "Актуальні проблеми сучасної енергетики": зб. тез доп. V всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції студентів, аспірантів і молодих вчених (м. Херсон, 20-22 травня, 2020р.). – Херсон: ПП "Резнік", 2020. – С. 132-135.
2. Степанчиков Д.М. Автоматизація процесу моніторингу рівня запиленості фотоелектричних модулів промислових сонячних електростанцій / Д.М. Степанчиков, М.О. Браточенко // II Всеукраїнська науково-практична інтернет-конференція молодих вчених та здобувачів вищої освіти "Сучасна молодь в світі інформаційних технологій" (м. Херсон, 14 травня, 2021 р.): Тези доповідей. – Херсон, Книжкове видавництво ФОП Вишемирський В.С., 2021. – С. 208-211.

АНАЛІЗ СТІЙКОСТІ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЦІ

Вінницький національний технічний

Анотація

У роботі розглянуто питання аналізу стійкості та оптимізації систем автоматичного регулювання напруги в електроенергетиці з використанням методології аналізу поведінки нелінійних нестационарних систем. Запропоновано підхід до визначення оптимальних параметрів регуляторів силових трансформаторів з РПН, що забезпечує компроміс між надійністю обладнання та якістю електроенергії. Результати моделювання підтверджують ефективність застосованої методики.

Ключові слова: автоматизовані системи регулювання напруги; стійкість; оптимізація; силові трансформатори; РПН; нелінійні системи; математичне моделювання; якість електроенергії.

Abstract

The paper addresses the issues of stability analysis and optimization of automatic voltage control systems in power engineering using the methodology of nonlinear nonstationary system behavior analysis. A novel approach is proposed to determine the optimal parameters of on-load tap changer transformer regulators, ensuring a compromise between equipment reliability and power quality. Simulation results confirm the effectiveness of the proposed methodology.

Keywords: automatic voltage control systems; stability; optimization; power transformers; on-load tap changer (OLTC); nonlinear systems; mathematical modeling; power quality

Вступ

Сучасні електричні мережі функціонують в умовах зростання нелінійних навантажень, що обумовлює погіршення якості електроенергії. Ключовим інструментом підтримання напруги у допустимих межах є автоматизовані системи регулювання (САР) силових трансформаторів з пристроями регулювання під навантаженням (РПН). Ці системи є дискретними, нелінійними та нестационарними, що унеможливує їх класичний аналітичний аналіз. Вирішення задач забезпечення стійкості та оптимізації параметрів можливе шляхом математичного моделювання із застосуванням методології аналізу поведінки нелінійних нестационарних систем (МАП ННС) [1-4,6].

Основні положення Дослідження показують, що ефективність роботи трансформаторів з РПН суттєво залежить від двох параметрів регуляторів: ширини зони нечутливості та часу затримки. Зменшення цих параметрів підвищує якість напруги, але водночас збільшує кількість комутацій і знижує ресурс РПН. Практичні експлуатаційні спостереження підтвердили, що регулятори типу АРТ-1Н часто формують зайві команди перемикавання, що призводить до підвищених втрат ресурсу обладнання. Для зменшення цієї проблеми запропоновано введення додаткової логічної умови - контролю знаку похідної обвідної напруги, що дозволяє уникати непотрібних перемикань. [2]

Інший напрям удосконалення САР стосується фільтрації гармонік, що виникають через нелінійні навантаження. Використання регульованих резонансних силових фільтрів дає можливість відновити синусоїдальність напруги у вузлах мережі. Регулювання здійснюється шляхом зміни індуктивності, що технічно простіше та безпечніше за зміну ємності. [5]

Математичне моделювання та оптимізація.

У середовищі Simulink побудовано структурні та імітаційні моделі САР трансформаторів з РПН. Аналіз перехідних процесів підтвердив їх стійкість у робочому діапазоні затримок (5-60 с), що обумовлено фільтруючими властивостями електроприводу. [2]

Задача оптимізації формулюється як мінімізація функціоналу збитків:

$$J = C_1 J_1 + C_2 J_2 \rightarrow \min,$$

де J_1 - функціонал ймовірності відмови трансформаторів, J_2 - функціонал втрат споживачів через погану якість напруги, C_1 , C_2 - вартісні коефіцієнти.

Розрахунки показали, що існує чіткий мінімум функціоналу, що дозволяє визначити оптимальні значення часу затримки залежно від конкретних умов експлуатації мережі. Експериментальні дослідження на підстанції з трансформаторами ТРДН-25000/110 підтвердили адекватність запропонованої методики.

На рисунку 1 наведено залежність функціоналів збитків J_1 (мережа), J_2 (споживач) та сумарного функціоналу J від часу затримки регулятора. Видно, що J має чіткий мінімум, що відповідає компромісу між надійністю обладнання та якістю електроенергії. Оптимальне значення часу затримки визначається точкою мінімуму.

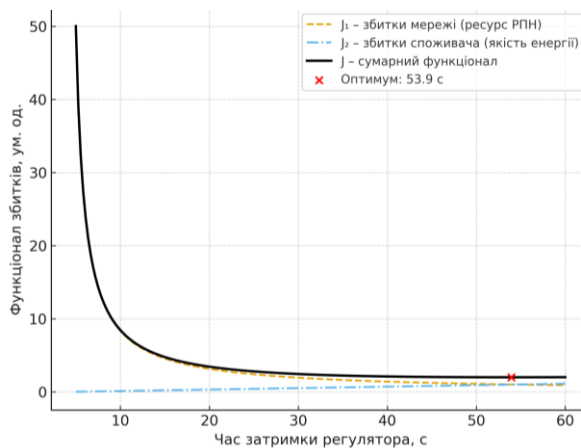


Рисунок 1 – Оптимізація параметрів САР на основі функціоналу збитків.

Висновки

Запропонований підхід дозволяє досліджувати стійкість дискретних нелінійних систем управління електричними мережами без спрощень та лінеаризації. Також, використання додаткового логічного контуру з контролем знаку похідної напруги знижує кількість непотрібних комутацій.

Оптимізація параметрів САР на основі функціоналу збитків забезпечує компроміс між надійністю роботи обладнання та якістю електроенергії, а практична реалізація методики можлива при наявності статистичних даних про зміну напруги та співвідношення економічних збитків виробників і споживачів електроенергії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Kovalchuk V.I., Petrenko O.M. Automated voltage control systems in power engineering. Kyiv: Naukova Dumka, 2020. – 245 p.
2. Hnatiuk M.S. Optimization of on-load tap changer transformer regulators. Electrical Systems and Complexes, 2021, vol. 2, pp. 33–41. DOI:10.32782/esc.2021.2.05
3. Kundur P., Balu N.J., Lauby M.G. Power System Stability and Control. New York: McGraw-Hill, 2022. – 1176 p.
4. Algorithmic methods of constructing the space of parameter increments in automated control systems of energy processes, M. Yukhimchuk, V. Kovtun, Y. Horchuk, V. Lesko. MoMLeT-2025: 7th International Workshop on Modern Machine Learning Technologies, June, 14, 2025, Lviv-Shatsk, Ukraine.
5. Перепелиця С., Юхимчук М., Лесько В. (2025). Моделювання кіберфізичних систем управління в умовах негативних зовнішніх факторів. Measuring and Computing Devices in Technological Processes, (1), 7–12. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2025-81-1>.
6. Стрембіцький П., Юхимчук М., Лесько В., Перепелиця С. (2025). Централізований моніторинг інфраструктури з використанням системи THANOS: перспективи та виклики. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences, 347(1), 417–422. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-347-57>. [6]

¹Юхимчук Марія Сергіївна - Д.т.н.т, професор кафедри комп'ютерних систем управління, БНТУ e-mail: umcmasha@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-8131-9739

²Стрембіцький Павло Павлович - аспірант, БНТУ e-mail: Mateyuk2@gmail.com

³Перепелиця Станіслав Сергійович - аспірант, БНТУ e-mail: stanislau3@gmail.com

⁴Лесько Владислав Олександрович - К.т.н., доцент кафедри електричних станцій та систем, БНТУ e-mail: leskovlad@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-5477-7080

¹Yukhimchuk Maria Serhiivna - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Computer Control Systems, VNTU e-mail: umcmasha@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-8131-9739

²Strembitsky Pavlo Pavlovych - Postgraduate Student, VNTU e-mail: Mateyuk2@gmail.com

³Perepelytsa Stanislav Serhiyovych - Postgraduate Student, VNTU e-mail: stanislau3@gmail.com

⁴Lesko Vladyslav Oleksandrovych - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Power Plants and Systems, VNTU e-mail: leskovlad@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-5477-7080

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ОПТИМАЛЬНОГО РУХУ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ З АСИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ЗА НАЯВНОСТІ НА ДОРОЗІ СПУСКІВ, ПІДЙОМІВ І НАСЕЛЕНОГО ПУНКТУ ТА ЗУПИНКОЮ У ЦЬОМУ ПУНКТІ

¹Вінницький національний технічний університет

Анотація

В наших роботах, узагальнених в монографії [1], розв'язана задача синтезу математичних моделей оптимального руху електромобіля з асинхронним електроприводом як горизонтальним відрізком дороги, так і при наявності спусків, підйомів і поворотів, але за умов, що електромобіль повинен проїхати від одного пункту до іншого за визначений термін часу з мінімальними витратами заряду акумуляторної батареї. Як показано в цих роботах, визначення траєкторій оптимального руху електромобіля у вигляді залежності від відносного часу τ відносного струму силової акумуляторної батареї $i(\tau)$ та відносної швидкості руху $v(\tau)$, здійснюється шляхом мінімізації критерію відносних витрат енергії e_k акумуляторної батареї.

Ключові слова: електромобіль, асинхронний електропривод, дорога через населений пункт зі спусками та підйомами, моделі оптимального руху, критерій мінімуму витрат заряду силової акумуляторної батареї, обмеження динамікою, відстанню та дорожніми знаками.

Abstract

In our works, summarized in the monograph [1], the problem of synthesizing mathematical models of optimal movement of an electric vehicle with an asynchronous electric drive is solved, both on a horizontal section of the road and in the presence of descents, ascents and turns, but under the condition that the electric vehicle must travel from one point to another in a certain period of time with minimal battery charge consumption. As shown in these works, the determination of the trajectories of optimal movement of an electric vehicle in the form of a dependence on the relative time τ of the relative current of the power battery $i(\tau)$ and the relative speed of movement $v(\tau)$ is carried out by minimizing the criterion of relative energy consumption e_k of the battery.

Keywords: electric vehicle, asynchronous electric drive, road through a settlement with descents and ascents, optimal movement models, criterion for minimum power battery charging costs, limitations by dynamics, distance, and road signs.

$$e_k = \int_0^{\tau_k} (1 - \alpha i) i d\tau, \quad (1)$$

в умовах дії лише обмежень, обумовлених динамікою електромобіля, визначеною рівнянням

$$\frac{dv}{d\tau} = \ln\left(i + \sqrt{i^2 + 1}\right) \frac{a^2 + b^2}{a^2 + b^2 s_*^2} s_* - f_0 - f_1 v - f_2 v^2 \quad (2)$$

та необхідності подолання відносної відстані l_k за відносний час τ_k , зв'язаної з відотною швидкістю $v(\tau)$ функціоналом

$$l_k = \int_0^{\tau_k} v d\tau, \quad (3)$$

Але ж під час подолання електромобілем відстані від стартового пункту до кінцевого на цьому відрізку дороги можуть зустрітись населені пункти, в яких правила дорожнього руху обмежують швидкість електромобіля, та дорожні знаки, що також обмежують його швидкість.

Тож актуальною задачею є синтез математичних моделей оптимального руху електромобіля шляхом мінімізації функціоналу (1), але з використанням не лише обмежень (2),(3), а і обмежень,

встановлених правилами дорожнього руху для проїзду населеними пунктами та встановлених дорожніми знаками за межами населених пунктів.

В нашій роботі [2] ця задача розв’язана для оптимального руху електромобіля горизонтальним відрізком дороги.

А у даній доповіді ми пропонуємо розв’язання цієї задачі ще й при наявності на дорозі спусків та підйомів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Б.І. Мокін, О.Б. Мокін, В.В. Горенюк. Системний аналіз оптимального руху електромобіля з асинхронним електроприводом. Монографія. Вінниця: ВНТУ. – 2023., 114 с.
2. Б.І.Мокін, О.Б.Мокін, Б. Д.Пасєка.Математичні моделі оптимального руху електромобіля з асинхронним електроприводом горизонтальним відрізком дороги за наявності на ньому населеного пункту та зупинкою у цьому пункті. Вісник Вінницького політехнічного інституту, №2, С.32-38, 2025

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ МАЛИХ ГЕС У КОНТЕКСТІ ЦИФРОВІЗАЦІЇ ЕНЕРГЕТИКИ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У статті розглянуто особливості застосування релейного захисту і автоматики (РЗА) на малих гідроелектростанціях (МГЕС). Проаналізовано сучасні вимоги до надійності та селективності захистів, а також інтеграцію МГЕС у Smart Grid-системи. Результати моделювання підтвердили, що використання цифрових технологій і адаптивних алгоритмів підвищує ефективність РЗА малих ГЕС [1–3].

Ключові слова: малі гідроелектростанції, релейний захист, автоматика, Smart Grid, цифрові двійники, селективність, моделювання.

Abstract

The article discusses the features of the application of relay protection and automation (RPA) at small hydroelectric power plants (SHPs). Modern requirements for the reliability and selectivity of protection, as well as the integration of SHPs into Smart Grid systems, are analyzed. The modeling results confirmed that the use of digital technologies and adaptive algorithms increases the efficiency of RPA of small hydroelectric power plants [1–3].

Keywords: small hydroelectric power plants, relay protection, automation, Smart Grid, digital twins, selectivity, modeling.

Вступ. Малі гідроелектростанції (МГЕС) відіграють важливу роль у розвитку відновлюваної енергетики та децентралізованої генерації. Ефективність і надійність їх роботи значною мірою залежить від систем релейного захисту і автоматики (РЗА). Традиційні електромеханічні пристрої не завжди відповідають сучасним вимогам, зокрема при інтеграції у Smart Grid [2]. Сучасні цифрові рішення провідних виробників (ABB, Siemens, Schneider) пропонують ширші можливості для моніторингу, адаптивності та віддаленого керування [1].

Метою дослідження є аналіз роботи релейного захисту і автоматики малих ГЕС, оцінка ефективності сучасних цифрових систем та визначення перспектив розвитку шляхом впровадження цифрових двійників і адаптивних алгоритмів [3].

У дослідженні використано моделювання у середовищах Matlab/Simulink та ETAP, що дозволило відтворити роботу основних релейних захистів: диференційного, максимального струмового, мінімальної напруги та автоматики повторного включення (АПВ). Особливу увагу приділено чутливості та селективності захистів, а також часу їх спрацювання у різних режимах [1, 2].

Порівняльний аналіз характеристик наведено у таблиці 1.

Таблиця 1 – Порівняльні характеристики релейного захисту для малих ГЕС

Виробник	Тип захисту	Час спрацювання, мс	Інтеграція у Smart Grid	Особливості
ABB Relion	Диференційний/струмовий	25–30	Так	Адаптивні налаштування, цифрова комунікація
Siemens Siprotec	Максимальний струмовий	28–32	Так	Інтеграція з системами Siemens
Schneider MiCOM	Комбінований	30–35	Так	Підтримка ІЕС 61850, гнучкі алгоритми
Електромеханічний	Максимальний струмовий	45–55	Ні	Надійність, відсутність цифрових функцій

Як видно з таблиці 1, цифрові релейні захисти провідних виробників (ABB, Siemens, Schneider) мають менший час спрацювання та забезпечують можливість інтеграції у Smart Grid, що є критично важливим для сучасних енергосистем [1, 2].

Висновки

Релейний захист і автоматика малих ГЕС є ключовим фактором їх надійної роботи. Моделювання показало переваги сучасних цифрових систем у швидкодії та селективності. Порівняльний аналіз підтвердив, що цифрові рішення перевершують традиційні електромеханічні пристрої. Подальші дослідження доцільно спрямувати на впровадження цифрових двійників та алгоритмів штучного інтелекту для адаптивного керування процесами захисту [4, 5].

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Kundur, P. (1994). (1176p). Power system stability and control. McGraw-Hill. <https://doi.org/10.1109/9780470545577>
2. IEEE Power & Energy Society. (2020). IEEE guide for hydropower plant relay protection. IEEE Standard 87-2020. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2020.9144870>
3. IEEE. (2019). Smart grids handbook. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119175391>
4. Перепелиця С., Юхимчук М., Лесько В. Моделювання кіберфізичних систем управління в умовах негативних зовнішніх факторів / С. Перепелиця, М. Юхимчук, В. Лесько // Measuring and Computing Devices in Technological Processes. — 2025. — № 1. — С. 7–12. — Режим доступу: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2025-81-1>
5. Юхимчук М., Лесько В. Інтеграція технічних систем з штучним інтелектом для автоматизованого розпізнавання зображень в енергетиці / М. Юхимчук, В. Лесько // Міжнародна науково-технічна конференція з оптико-електронних та інформаційних технологій. — 2025..

Юхимчук Марія Сергіївна - д.т.н., проф. каф. КСУ, ВНТУ <https://orcid.org/0000-0002-8131-9739> e-mail: umcmasha@gmail.com

Лесько Владислав Олександрович - к.т.н., доц. каф. ECC, ВНТУ <https://orcid.org/0000-0002-5477-7080> e-mail: leskovlad@ukr.net тел. 0972114434

Климчук Олександр Валерійович - аспірант каф. ECC, ВНТУ e-mail: aleksandr.klymchuk@gmail.com

Горчук Юрій Анатолійович – аспірант каф. КСУ, ВНТУ yurii.horchuk@gmail.com

Ткачук Олександр Володимирович – магістр гр. EC-24м каф. ECC, ВНТУ e-mail: sashatkachukua4@gmail.com

Yukhimchuk Maria Serhiivna - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Computer Science, VNTU <https://orcid.org/0000-0002-8131-9739> e-mail: umcmasha@gmail.com

Lesko Vladyslav Oleksandrovych - Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Computer Science, VNTU <https://orcid.org/0000-0002-5477-7080> e-mail: leskovlad@ukr.net tel. 0972114434

Klimchuk Oleksandr Valeriyovych - Postgraduate Student of the Department of Computer Science, VNTU e-mail: aleksandr.klymchuk@gmail.com

Gorchuk Yuriy Anatoliyovych - Postgraduate Student of the Department of Computer Science, VNTU yurii.horchuk@gmail.com

Tkachuk Oleksandr Volodymyrovych - Master of Science, Department of Computer Science-24m, Department of Computer Science ESC, VNTU e-mail: sashatkachukua4@gmail.com

А. М. Падалко
Н. Й. Падалко
Д. С. Собчук
О. І. Костючик

ДОСЛІДЖЕННЯ КЕРУВАННЯ СПОЖИВАННЯМ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В АСИНХРОННОМУ ДВИГУНІЗ КОРОТКОЗАМКНУТОЮ ОБМОТКОЮ

Луцький національний технічний університет
Волинський національний університет імені Лесі Українки

Анотація

Авторами проаналізовано споживання електроенергії асинхронним двигуном з короткозамкнутою обмоткою при різних способах управління методом математичного моделювання. В роботі розроблена математична модель блоку обчислень спожитої енергії на основі моделі асинхронного двигуна.

Ключові слова: енергозбереження, асинхронний двигун, Simulink, моделі.

Abstract

The authors analyzed the power consumption of an asynchronous motor with a squirrel-cage winding under different control methods using mathematical modeling. The paper develops a mathematical model of the power consumption calculation unit based on the asynchronous motor model.

Keywords: energy saving, asynchronous motor, Simulink, models.

Вступ

Недооцінка енергозбереження зменшила до критичного рівня надійність енергозбереження України, а подальший ріст енергоємності ВВП, без прийняття термінових заходів з енергозбереження викличе серйозні негативні наслідки для всієї економіки країни в цілому.

Гострота проблеми економії енергії привела до широкого використання регульованих асинхронних електродвигунів, які дозволяють мінімілізувати споживання енергоресурсів. Незважаючи на високу вартість впровадження, терміни окупності регульованих електродвигунів за рахунок економії електроенергії, зазвичай, не перевищують трьох років. При масовому впровадженні в масштабах країни економія може становити 8-12% від всієї вироблюваної електроенергії.

Вважаємо, що пошук оптимальних режимів роботи асинхронного двигуна з короткозамкнутою обмоткою методами математичного моделювання є актуальним.

Мета роботи: проаналізувати споживання електроенергії асинхронним двигуном з короткозамкнутою обмоткою при різних способах управління методом математичного моделювання.

Об'єктом дослідження є режими роботи асинхронного двигуна з короткозамкнутою обмоткою.

Результати дослідження

Для розв'язку задачі оптимізації роботи асинхронних двигунів застосовано широкий арсенал засобів сучасної прикладної математики, проведено експериментальне дослідження, проаналізовано різноманітні гіпотези, розроблено нові підходи і методи.

Методами математичного моделювання розроблені рекомендації з оптимізації роботи асинхронних двигунів з короткозамкнутою обмоткою на підприємствах.

Нами розроблена математична модель блоку обчислень спожитої енергії на основі моделі асинхронного двигуна.

Використання блоку на основі Simulink спрощує процедуру розрахунку спожитої електричної енергії, оскільки не потребує від розробника додаткових затрат.

Розроблена математична модель блоку обчислень спожитої енергії асинхронного двигуна 4A180M2У3 та фізичних процесів при пуску цього двигуна при різних режимах та навантаженнях.

За методикою використаній нами в роботі [1] запропоновано схему розрахунку та розроблене відповідне програмне забезпечення спожитої енергії при різних режимах керування асинхронним двигуном в режимі пуску.

Проведено моделювання спожитої енергії від електромережі за один цикл роботи асинхронного двигуна 4A180M2У3 при різних режимах його роботи;

Визначенню втрати енергії в цих режимах роботи електричного асинхронного двигуна 4A180M2У3 за допомогою Simulink;

Для електричного асинхронного двигуна 4A180M2У3 проведено моделювання розподілу втрат на втрати в статорі та роторі;

Використання блоку обчислень спожитої енергії дозволяє отримати достатньо повні данні для техніко-економічного обґрунтування для використання асинхронного двигуна 4A180M2У3. При цьому для оцінки споживання електроенергії необхідно побудувати моделі порівняльних систем електроприводу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Anatoliy Padalko; Nina Padalko; Kateryna Padalko. Mathematical Methods of Analyzing Power Consumption by an Induction Motor with a Squirrel-Cage Winding// Lecture Notes in Networks and Systems, vol. 1467, 2025, pp. 174–184.

2. International Energy Agency (IEA). Motor-driven system electricity use as a share of electricity use by industry subsector [Internet]. 2020 [cited 2025 Jun 26]. Available from: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/motor-driven-system-electricity-use-as-a-share-of-electricity-use-by-industry-subsector>

3. Bui MD. Efficiency Improvement of Squirrel Cage Induction Motor by Rotor Slot Designs. In: Proceedings of the 13th International Conference on Industrial Engineering and Operations Management (IEOM); 2023 Mar; Manila, Philippines. p. 615–23. doi:10.46254/AN13.20230184.

Падалко Анатолій Михайлович — канд. фіз.-мат. н., доцент кафедри електричної інженерії, Луцький національний технічний університет.

Падалко Ніна Йосипівна. — канд., к. пед. н., доцент кафедри теорії функцій та методики викладання математики, Волинський національний університет імені Лесі Українки.

Собчук Дмитро Сергійович — канд. техн. наук, доцент кафедри електричної інженерії, Луцький національний технічний університет.

Костючик Олександр Іванович — здобувач вищої освіти Луцький національний технічний університет.

Padalko Anatoly M. — Cand. Sc. (physical and mathematical), Assistant Professor of Electrical Engineering, Lutsk National Technical University, Lutsk.

Padalko Nina I. — Cand. Sc. (Pedagogical), Assistant Professor Department of Function Theory and Mathematics Teaching Methodology, Faculty of Information Technology and Mathematics. Lesya Ukrainka Volyn National University.

Sobchuk Dmytro S. — Cand. Sc. (Eng), Assistant Professor of Electrical Engineering, Lutsk National Technical University, Luts.k..

Kostiuchyk Oleksandr — higher education student Lutsk National Technical University

ТЕХНОЛОГІЇ ЕФЕКТИВНОГО ВИКОРИСТАННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПАНЕЛЕЙ НА ДАХУ ЕЛЕКТРОБУСІВ

Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова

Анотація

Досліджуються шляхи найефективнішого використання електробусів за рахунок застосування фотоелектричних систем. Структуровані підходи, які надають кращого розуміння аспектів збільшення кількості виробленої енергії від фотоелектричних панелей на даху електробуса.

Ключові слова: електробус, фотоелектрична панель, структуризація аспектів, енергоефективність

Abstract

The most efficient use of electric buses through the use of photovoltaic systems is being investigated. Structured approaches are being developed that provide a better understanding of the aspects of increasing the amount of energy produced from photovoltaic panels on the roof of an electric bus.

Keywords: electric bus, photovoltaic panel, aspect structuring, energy efficiency

Вступ

В сучасному світі електробус здобуває все більшого значення для перевезення населення різних країн. Впровадження цього виду транспорту просуває ідею «зеленої енергетики», а різні стратегічні програми і концепції урядів держав сприяють подальшому розвитку. В Україні створена Концепція щодо «зеленого» енергетичного переходу України до 2050 року [1], в якій розвиток екологічного транспорту у містах і запровадження енергозбереження на всіх етапах процесу перевезень є пріоритетним заходом.

Не дивлячись на економію викопних ресурсів, що надає електробус, перед цим видом транспорту постає питання ще більш заощадливого їх використання, яке може вирішуватися впровадженням додаткового джерела живлення, зокрема, від фотоелектричних панелей, що розташовані на даху. Таке застосування уможливорює генерацію частини необхідної енергії, яка йде на живлення допоміжних систем і може частково компенсувати витрати енергії на тягу. До того ж впровадження фотоелектричних панелей зменшує вплив на енергомережу та експлуатаційні витрати [2]. Впровадження нової технології потребує вирішення низки технічних, технологічних і економічних питань, пов'язаних з вдосконаленням систем накопичення енергії та підвищення ефективності фотоелектричних модулів. Різноманітні сучасні фотоелектричні технології надають можливі резерви пошуку подальшої економії, а для кращого розуміння потребується структуривання можливих шляхів ефективного застосування фотоелектричних панелей на електробусі.

Метою цієї роботи є структуризація можливих шляхів отримання більшої кількості енергії від фотоелектричних модулів у разі використання на електробусах.

Основні результати

Першим заходом є підвищення коефіцієнта корисної дії фотоелектричних модулів, що досягається традиційними способами фотоелектричної індустрії: комбінацією різних хімічних поглинаючих матеріалів, змінюванням архітектури модулів та створюванням механічних та електричних впливів на комірки. Різні *хімічні поглинаючі матеріали* для фотомодулів такі, як монокристалічні або полікристалічні кремнієві елементи, тонкоплівкові технології з аморфного кремнію, телуриду кадмію та перовськіти демонструють перспективні результати у використанні, а новітні технології, що містять органічні та полімерні сонячні елементи, на етапі розвитку і досліджень надають низку легких та гнучких рішень. *Змінюванні архітектури фотоелектричних модулів* складається в їх будові з різних комбінацій хімічних елементів. До

гібридних технологій належать: перовскітні сонячні елементи, що містять різні елементи на підкладках; тандемні комірки, що мають декілька шарів різної здатності поглинання сонячного випромінювання; технології пасивованого діелектричного шару, що зменшують рекомбінацію електронів для кращого поглинання світла; гетероструктурні комірки, в яких поєднанні шари монокристалічного та аморфного кремнію; двосторонні фотоелементи, які уможливають генерацію електроенергії з фронтального і зворотного боку панелі. Допомагають підвищити ефективність технологій впливу на виготовлення фотокомірки такі способи, як: половинчасті фотоелементи, які отримують розрізанням сучасними лазерами навпіл; гетероструктурні комірки з кристалічним кремнієм і шаром аморфного кремнію з гетеропереходом, фотоелементи з гетеропереходом, які отримують трьохкроковим лазерним формуванням візерунка, не пошкоджуючи комірки [3].

Другим заходом підвищення кількості виробленої енергії на електробусі є *збільшення корисної площі* для розміщення бортових фотоелектричних панелей, а саме розташування панелей і на даху і з боків транспортного засобу [4]. Сучасні технології дають змогу також інтегрувати фотоелементи до кузова та дверей, а використання гнучких і прозорих панелей – замість вікон транспортного засобу. Як захід можуть використовуватися *розсувні панелі* [5], однак застосування їх на електробусі вимагає забезпечення певної конструкції з незначною вагою. Для приведення в дію панелей потрібно застосовувати привод з додатковим живленням, а забезпечення безпеки під час пересування робить доцільним застосування такої технології тільки на кінцевих станціях під час технічних стоянок і обідніх перерв. Також фотоелектричні панелі можна розташовувати на причепах разом з додатковими акумуляторними батареями в електробусах, в яких причеп застосований для ефективного використання його місткості. Підвищити кількість виробленої енергії фотоелектричними модулями допомагає позиціонування фотомодулів у певному положенні для створення максимальної потужності, коли застосовують активні панелі, що керуються трекарами, і створюється оптимальна орієнтація і нахил до променів сонця [6]. На практиці цю технологію використовують для стаціонарних фотоелектричних станцій, однак невідомо наскільки ефективно працювати ця система на даху електробусів, в яких траєкторія руху залежно від траси маршруту може достатньо швидко змінюватися.

Третій захід для збільшення продуктивності бортової фотоелектричної електростанції без додавання сонячних панелей пов'язаний із застосуванням *контролерів та інших електромеханічних пристроїв*. Такі технології впроваджуються в експлуатації і набувають широкого вивчення в експериментальних дослідженнях. Так розробляються методи і моделі контролерів, які стежать за точкою максимальної потужності фотоелектричної батареї. Ринок продукції пропонує ТМП-контролери з покращеною схемотехнікою, що мають надійні електронні компоненти та керуються мікропроцесором. Завдання пристрою відстежувати струм та напругу на фотоелектричній панелі та визначати найкраще поєднання їхніх значень для забезпечення максимальної потужності фотопанелі [7]. Метод отримання максимальної потужності у роботі [7] враховує дві стратегії керування із застосуванням гістерезисного контролера, який побудований на базі двотактного і понижувального перетворювача. До того ж зазначається, що продуктивність перетворювача залежить від алгоритму керування, який обирають для створення керуючого сигналу. До алгоритмів керування можуть належати динамічні та статичні методи, сімейство інтелектуальних методів, таких як генетичний алгоритм, нейронна мережа та нечітка логіка.

Запропонований спосіб посилення низьких напруг, які виробляють фотоелектричні батареї у разі слабкого сонячного світла, у дослідженні [8], де керуючий пристрій складається з генератора, що підсилює і регулює автоматично вхід низької напруги, а інвертор, завдання якого змінювати негативну напругу на одному з виходів генератора, поєднаний з пристроєм підсумовування для збільшення напруги. Запатентована конструкція блоку для зарядження фотоелектричної панелі для електробусів і важких електричних транспортних засобів, який забезпечує високу потужність завдяки інтеграції в конструкцію системи керування МОП-транзистора, що виконує посилення електронних сигналів, а датчик вихідного струму оцінює ефективність зарядження фотоелектричної панелі [9].

Висновки

Структуровані підходи щодо отримання більшої кількості енергії від фотоелектричних панелей на даху електробусів. Структура заходів містить традиційні підходи фотоелектричної галузі, в якій застосовують різні хімічні сполуки і поглинаючі матеріали, архітектурну конструкцію модулів та різнотипи механічних і електричних впливів, відомі способи збільшення корисної площі поглинання панелей: розсувні, з різних боків і на причепі, а також враховує методи керування фотоелектричною установкою за допомогою контролерів та різних електромеханічних пристроїв.

Список використаної літератури

- [1] Концепція «Зеленого» енергетичного переходу України до 2050 року. Міністерство енергетики та захисту довкілля. 2020. Режим доступу: <https://menr.gov.ua/news/34424.html> (дата звернення: 15.10.2024).
- [2] Hnatov A., Arhun Shch., Ponikarovska S. Energy saving technologies for urban bus transport. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 2018. Vol. 14. Is. 4. P. 4649 – 4664.
- [3] Перспективні технології фотоелектричної сонячної енергетики. Режим доступу : <https://razumkov.org.ua/statti/perspektyvni-tekhnologii-fotoelektrychnoi-soniachnoi-energetyky> (дата звернення: 1.10.2024).
- [4] Mallon K. R., Assadian F., Fu B. Analysis of on-board photovoltaics for a battery electric bus and their impact on battery lifespan. *Energies*, 2017. 10. P. 943 – 974.
- [5] Vantagodi N. V., Rao A. R. Case study on PV integrated grid independent electric bus. *Strategic Planning for Energy and the Environment*, 2021. Vol. 39. P. 179 – 198.
- [6] Sharma S., Swami R. K. Solar powered electric vehicle using maximum power point tracking. *Material Science & Engineering International Journal*, 2022. 6(4). P. 132 – 135.
- [7] Brahmi H., Gammoudi R., Dhifaoui R. Real optimisation of a PV system based on hysteresis controllers over sun: design, implementation, and comparative study. *Hindavi Engineering Journal*. Vol. 2021, article 6689121, 16 p.
- [8] Amplification of very low output voltages of PV panels using a Duffing oscillator // H. F. Emakoua, G. V. Ayissi Eyebe, A. S. Wakata, J. S. Armand Eyebe Fouda, M. Kom / *Heliyon*, 2024. Vol. 10. Is. 20. e38982.
- [9] Patent WO2011079789A1. Solar charger for charging power battery. Publication 2011-07-07.

Кульбашина Надія Іванівна – канд. техн. наук, доцент кафедри електричного транспорту Харківського національного університету міського господарства ім. О.М. Бекетова, E-mail – kulbakanadia810@gmail.com

Далека Василь Хомич – док. техн. наук, професор кафедри електричного транспорту Харківського національного університету міського господарства ім. О.М. Бекетова, E-mail – dalekavf@ukr.net

Лукашова Наталя Павлівна – канд. техн. наук, доцент кафедри електричного транспорту Харківського національного університету міського господарства ім. О.М. Бекетова, E-mail – lukaschova.natalya@gmail.com

АВТОМАТИЗОВАНЕ УПРАВЛІННЯ МЕРЕЖЕВОЮ АРХІТЕКТУРОЮ СОНЯЧНОЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ З СИСТЕМАМИ ЗБЕРІГАННЯ ЕНЕРГІЇ

¹Вінницький національний технічний університет

Анотація

Запропоновано підхід до реалізації автоматизованої системи управління мережевою архітектурою СФЕС із застосуванням стаціонарних систем зберігання енергії, що забезпечує оптимізацію, надійність та гнучкість електропостачання підприємств в умовах енергетичної кризи.

Ключові слова: автоматизована система управління, сонячна фотоелектрична станція, енергетична безпека, мережева архітектура, гібридний інвертор.

Abstract

An approach to implementing an automated system for managing the network architecture of a solar power plant using stationary energy storage systems is proposed, which ensures optimization, reliability, and flexibility of power supply to enterprises in the context of an energy crisis.

Key words: automated control system, solar photovoltaic station, energy security, network architecture, hybrid inverter.

Вступ

Повний контроль за електропостачанням у різних режимах роботи є ключовим фактором для ефективної та безперебійної роботи сонячної електростанції (СЕС). Управління енергопостачанням передбачає регулювання потужності генерації, балансування енергії в мережі, оптимізацію роботи різних джерел електроенергії та забезпечення відповідності потребам споживачів і ринковим умовам. Такий підхід сприяє стабільності та надійності електропостачання, підвищенню його ефективності та оптимізації використання енергетичних ресурсів. Крім того, можливість повного контролю дозволяє оперативно реагувати на зміни експлуатаційних умов, забезпечуючи раціональне використання наявних ресурсів і запобігаючи перебоєм у постачанні електроенергії. Це, у свою чергу, зміцнює енергетичну безпеку та гарантує стабільну роботу електроенергетичної системи за різних навантажень та змінних виробничих умов.

Мережеві сонячні електростанції на основі інверторів є найпоширенішими, проте вони не можуть працювати автономно і припиняють функціонування при відсутності опорної мережі, що знижує їхню ефективність та надійність. Рішенням цієї проблеми є впровадження автоматизованих систем управління зберіганням енергії (ESS), які дозволяють накопичувати надлишкову електроенергію, перерозподіляти її та забезпечувати резервне живлення. В Україні використання ESS поки що розвивається, однак їхнє впровадження є критично важливим для підвищення енергетичної стабільності та ефективності відновлюваних джерел енергії.

Метою роботи є розгляд підходу до поєднання сонячної електростанції з системою накопичення енергії та її системою управління для електропостачання підприємства, що забезпечує оптимальне використання сонячної енергії, резервування потужностей та ефективне керування всіма джерелами генерації навіть при відсутності зовнішньої мережі.

Об'єктом дослідження є система електропостачання підприємства з використанням сонячної фотоелектричної станції (СЕС), системи зберігання енергії (BESS) та її системи управління для підвищення ефективності та надійності генерації.

Основна частина

Енергетичні ресурси є основою економічного зростання: без енергії неможливий розвиток виробництва, інфраструктури та добробуту. Жодна успішна держава не характеризується низьким рівнем енергоспоживання, так само як жодна бідна країна не має потужного й конкурентоспроможного енергетичного ринку [1].

Детальне вивчення роботи системи керування мережевими сонячними електростанціями із впровадженням систем накопичення електроенергії (ESS) є ключовим для підвищення ефективності та

стабільності електропостачання. Такі системи дозволяють регулювати енергетичні потоки, оптимізувати генерацію, зменшувати надлишковий експорт у мережу та забезпечувати безперебійну роботу станції. Подальший розвиток технологій накопичення, розподілу та управління енергетичними потоками відіграє визначальну роль у підвищенні ефективності сучасних сонячних енергетичних комплексів.

В роботі запропоновано підхід до побудови інтегрованої мережевої конфігурації сонячної фотоелектричної системи типу On/Off-grid PV+ESS. Інтеграція стаціонарної системи зберігання електроенергії в архітектуру станції забезпечує резервування потужностей та акумулювання енергії, що є критично важливим для підвищення гнучкості, надійності та загальної ефективності енергозабезпечення промислових об'єктів, інтегрованих із сонячною електростанцією.

У запропонованій конфігурації система накопичення та зберігання енергії (ESS) під'єднана до фотогальванічної установки через спільну шину змінного струму. Мікромережа може гнучко з'єднуватися із зовнішньою електромережею або відключатися від неї за допомогою моторизованого мережевого вимикача. Під час автономної роботи (поза мережею) ESS виступає основним джерелом електроживлення, забезпечуючи критично необхідну енергію разом із сонячною електростанцією.

До складу системи входять мережеві сонячні інвертори, система накопичення електроенергії, розумний лічильник, смарт-логер та смарт-мітер для збору та обробки даних, обладнання для розподілу електроенергії, контролер мікромережі та джерело безперебійного живлення (ДБЖ) для управління системою.

Система управління забезпечує різні режими роботи для оптимізації використання електроенергії від СЕС. Функція Peak shaving дозволяє зменшити пікове навантаження на електромережу в години максимального споживання, що сприяє зниженню витрат на електроенергію. Режим пікового обмеження потужності регулює споживання у періоди пікових навантажень або при максимальному власному споживанні, також забезпечуючи економію [2].

Крім того, система підтримує режим максимального самоспоживання, який пріоритетно використовує власну вироблену сонячну енергію замість закупівлі її з мережі. Вона також дозволяє планувати споживання електроенергії у визначені часові проміжки, що забезпечує ефективний розподіл навантаження, підвищує енергоефективність та дає змогу гнучко керувати енергоспоживанням підприємства відповідно до його потреб і тарифних зон.

Висновки

Проаналізовано систему управління мережевою архітектурою гібридної енергетичної установки типу on/off-grid PV+ESS, яка інтегрує сонячну генерацію та стаціонарні системи накопичення електроенергії. Така система управління дозволяє ефективно координувати енергетичні потоки між різними джерелами виробництва, накопичувачами та споживачами електроенергії, забезпечуючи стабільне і безперебійне функціонування СЕС у різних режимах роботи. Завдяки інтеграції ESS у мережеву конфігурацію, система може зберігати надлишкову енергію, генеровану сонячною станцією, та використовувати її у періоди підвищеного навантаження або при відключенні зовнішньої мережі, що значно підвищує гнучкість і надійність роботи установки. Крім того, така організація енергетичних потоків дозволяє мінімізувати залежність від зовнішніх джерел електропостачання, забезпечуючи автономність окремих споживачів або виробничих процесів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Енергетика: світові тенденції 2025 [Електронний ресурс] – Режим доступу https://www.libertyinstitute.org/articles/energetika-svitovi-tendencziyi-2025?utm_source=chatgpt.com
2. On/Off-Grid PV+ESS (VSG) System [Електронний ресурс] – Режим доступу URL: <https://support.huawei.com/enterprise/en/doc/EDOC1100312095/3762859f/on-off-grid-pvess-vsg-system>
3. Іскра Б.І., Паянок О.А. Впровадження мережевої архітектури сонячної фотоелектричної станції з установками зберігання електроенергії. Матеріали LIV науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ, Вінниця, 24-27 березня 2025 р. Електрон. текст. дані. 2025. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-feeem/all-feeem-2025/paper/view/24082/19854>

Іскра Богдан Ігорович — ст. гр. ЕПА-24м, факультет Електроенергетики та електромеханіки, Вінницький національний технічний університет, ел. пошта: bohdan.iskra.i@gmail.com.

Паянок Олександр Анатолійович – канд. техн. наук, доцент катедри комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів, Вінницький національний технічний університет, ел. пошта: opayanok@gmail.com.

Науковий керівник: **Паянок Олександр Анатолійович** – канд. техн. наук, доцент катедри комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця.

Iskra Bohdan Igorovych — student of the group EPA-24м, Faculty of electricity power engineering and electromechanics. Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: bohdan.iskra.i@gmail.com.

Payanok Oleksandr Anatoliyovych – PhD, Associate Professor of the Department of computerized electromechanical systems and complexes, Vinnytsia national technical university, e-mail: oapayanok@gmail.com.

Scientific advisor: Payanok Oleksandr Anatoliyovych – PhD, Associate Professor of the Department of computerized electromechanical systems and complexes, Vinnytsia national technical university, Vinnytsia.

ЗАСТОСУВАННЯ ПРОГРАМНИХ СЕРЕДОВИЩ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ СУШКИ ЗЕРНА

¹Вінницький Національний Технічний Університет

Анотація

Розглянуто основні принципи розроблення та впровадження програмних середовищ для автоматизованої системи управління технологічним процесом сушки зерна. Зокрема, запропоновано підхід до інтеграції у систему керування мов програмування, стандартизованих згідно з міжнародним стандартом IEC 61131-3, що регламентує структуру та методи програмування промислових контролерів.

Ключові слова: технологічний процес, сушильне обладнання, температурний режим, рівень вологості, автоматизовані системи, регульовальний контур, оптимізація процесу, налаштування параметрів, програмування систем, міжнародні стандарти.

Abstract

The paper considers the basic principles of development and implementation of software environments for an automated control system for the technological process of grain drying. In particular, an approach to integrating programming languages standardized in accordance with the international standard IEC 61131-3, which regulates the structure and methods of programming industrial controllers, into the control system is proposed.

Keywords: automated control system, grain drying, software environments, IEC 61131-3, industrial controllers, optimization of the technological process, automation systems.

Вступ

Автоматизація технологічних процесів є ключовим фактором підвищення ефективності виробництва та мінімізації впливу людського фактору [1]. Проблема автоматизації виробничих процесів на підприємствах в даний час стоїть дуже гостро, адже для підвищення конкурентоспроможності підприємства та виходу його на нові більш високі ринкові відносини необхідно контролювати два головних фактори: якість та потужність. Під якість слід розуміти не тільки відповідність вимогам стандарту, а і цілісне функціонування підприємства відповідно до системи управління якістю яка впровадження на підприємстві, дотримання міжнародних стандартів серії ISO [2]. Масове виробництво створює сприятливі умови для впровадження комплексної автоматизації за рахунок стабільності процесів і стандартизованих операцій [3].

Метою роботи є розгляд підходів до впровадження стандарту IEC 61131-3 у систему автоматизації процесу сушки зерна для підвищення точності регулювання, гнучкості та надійності та побудова на їх основі багатокomпонентної автоматизованої системи управління (АСУ) технологічним процесом сушки зерна в умовах ТОВ «Українська елеваторна компанія».

Об'єктом дослідження є автоматизованої системи управління технологічним процесом сушки зерна в умовах ТОВ «Українська елеваторна компанія».

Основна частина

Автоматизоване сушіння зерна забезпечує стабільну якість і довготривале зберігання зернових [4]. Сучасні системи керування підвищують ефективність, забезпечуючи контроль параметрів сушіння [5].

Технічне забезпечення АСУТП являє собою сукупність апаратних засобів, необхідних для повноцінного функціонування системи та реалізації всіх її основних завдань. До складу комплексу технічних засобів (КТЗ) входять пристрої обчислення та керування, сенсори для збору даних, засоби перетворення, зберігання, відображення й реєстрації інформації, а також системи передачі сигналів і

виконавчі механізми [5]. Сучасні системи автоматизації широко базуються на мікропроцесорних технологіях, серед яких провідну роль відіграють промислові контролери, інтелектуальні датчики, перетворювачі, операторські панелі та виконавчі пристрої. Наявність у них обчислювальних можливостей забезпечує розширену функціональність, підвищену гнучкість та адаптивність систем управління.

До програмних засобів рівня АСУТП належать системи створення автоматизованих робочих місць (АРМ) операторів та технологів, серед яких особливе місце займають SCADA-системи (Supervisory Control and Data Acquisition — диспетчерське керування та збір даних) і HMI-рішення (Human-Machine Interface — людино-машинний інтерфейс). Використання SCADA-технологій забезпечує високий ступінь автоматизації під час реалізації завдань моніторингу та управління технологічними процесами. Такі системи дозволяють ефективно збирати, обробляти, передавати, зберігати та відображати інформацію, що суттєво підвищує оперативність, точність і надійність функціонування автоматизованих систем управління.

Стандарт IEC 61131-3, який використовується для побудови автоматизованої системи управління технологічним процесом сушки зерна описує загальні елементи і мови програмування. Загальні елементи включають такі поняття, як конфігурація, ресурс, задача, тип даних, змінні, стандартні функції і блоки. Вони створюють основу, яка дозволяє об'єднати багатомовні компоненти в одному програмному проекті. Друга частина стандарту описує синтаксис трьох графічних мов програмування LD, FBD, SFC і двох текстових – IL, ST.

Тобто загалом стандарт IEC 61131-3 включає в себе:

- LD (Ladder Diagram) – мова релейних схем.
- FBD (Function Block Diagram) – для опису логіки блоками.
- SFC (Sequential Function Chart) – послідовна логіка для контролю процесів.
- IL (Instruction List) – наближена до асемблера
- ST (Structured Text) – структурована мова високого рівня.

Використання стандарту забезпечує гнучкість, масштабованість та зручність налаштування системи під специфіку технологічного процесу [6].

Висновки

Розглянуто основні принципи розробки та впровадження програмних середовищ для автоматизованої системи управління технологічним процесом сушки зерна. З використанням вище зазначених мов програмування та принципів інтеграції програмних середовищ в системи автоматизації було побудовано багатокомпонентну автоматизовану систему управління (АСУ) технологічним процесом сушки зерна в умовах ТОВ «Українська елеваторна компанія» [6]. Інтеграція стандарту IEC 61131-3 в АСУТП сушки зерна дозволяє досягти високої точності регулювання, гнучкості конфігурації та стабільності роботи системи. Забезпечується ефективна взаємодія між технічними, програмними й організаційними компонентами підприємства.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

4. Схиртладзе А. Г. Автоматизація технологічних процесів та виробництв: Посібник / А.Г. Схиртладзе, А.В. Федотов, В.Г. Хомченко. — М. : Абрис, 2012. — 565 с.
5. Брюханов В. Н. Автоматизація виробництва. / В.Н. Брюханов. — М. : Вища школа, 2005. — 367 с.
6. Битюков В.К., Волчкевич Л.І., Голоденко Б.А. Автоматизація технологічних процесів промислових виробництв: навчальний посібник. — Вороніж: ВГТА, 2007. — 212 с.
7. Іванов, А.А. Автоматизація технологічних процесів та виробництв: Навчальний посібник / А.А. Іванов — М. : Форум, 2012. — 224 с.
8. Автоматизація виробничих процесів: підручник. / І.В. Ельперін, О.М. Пупена, В.М. Сідлецький, С.М. Швед. К.: Видавництво Ліра-К, 2015. — 378 с.
9. Тимків З.О., Паянок О.А. Принципи побудови програмних середовищ автоматизованої системи управління технологічним процесом сушки зерна. Матеріали LIV науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ, Вінниця, 24-27 березня 2025 р. Електрон. текст. дані. 2025. URI: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-feeem/all-feeem-2025/paper/view/24081/19855>

Тимків Зоряна Олегівна — ст. гр. ЕПА-24м, факультет Електроенергетики та електромеханіки, Вінницький національний технічний університет, ел. пошта: tymkivzoriana@gmail.com.

Паянок Олександр Анатолійович – канд. техн. наук, доцент катедри комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів, Вінницький національний технічний університет, ел. пошта: oaipayanok@gmail.com.

Науковий керівник: **Паянок Олександр Анатолійович** – канд. техн. наук, доцент катедри комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця.

Tymkiv Zoryana Olehivna – student of the group EPA-24m, Faculty of electrical power engineering and electromechanics, Vinnytsia national technical university, e-mail: tymkivzoriana@gmail.com.

Payanok Oleksandr Anatoliyovych – PhD, Associate Professor of the Department of computerized electromechanical systems and complexes, Vinnytsia national technical university, e-mail: oaipayanok@gmail.com.

Scientific advisor: Payanok Oleksandr Anatoliyovych – PhD, Associate Professor of the Department of computerized electromechanical systems and complexes, Vinnytsia national technical university, Vinnytsia.

ОСОБЛИВОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ ДО СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

¹Національний Університет «Запорізька політехніка»

²Вінницький Національний Технічний Університет

Анотація

Розглянуто особливості побудови бортового комплексу електропостачання-електроспоживання літального апарату з використанням відновлюваних джерел енергії та силових установок на базі асинхронних електродвигунів з короткозамкнутим ротором, з можливістю їх використання у генераторному режимі. Встановлено, що впровадження відновлюваних джерел електричної енергії в системи бортового електропостачання літальних апаратів має місце, між тим перспективним та актуальним залишається питання впровадження їх в структуру електропостачання бортових комплексів літальних апаратів.

Ключові слова: літальні апарати, відновлювані джерела енергії, електропостачання.

Abstract

The features of the construction of the aircraft's on-board power supply-consumption complex using renewable energy sources and power plants based on asynchronous electric motors with a squirrel-cage rotor, with the possibility of their use in generator mode, are considered. It has been established that the introduction of renewable sources of electrical energy into the aircraft's on-board power supply systems is taking place, however, the issue of their introduction into the structure of the on-board power supply of aircraft complexes remains promising and relevant.

Keywords: aircraft, renewable energy sources, power supply.

Вступ

Політ літального апарату (ЛА) значно впливає на функціонування всього комплексу електрообладнання.

Зовнішні фактори, котрі діють на електротехнічні установки, можуть привести до різного роду пошкоджень, наприклад, до обриву проводів і обмоток, особливо в місцях їх пайки, до появи тріщин і псування електроізоляційних матеріалів, прискореного зносу осей і підшипників у виконавчих електричних приладах, відхиленнях від нормальної роботи пружинних і рухомих елементів електроапаратів, виходу із ладу генеруючих установок на борту ЛА [1].

Між тим, тактико-технічні вимоги, які пред'являються до устаткування літальних апаратів, розроблені з урахуванням умов роботи електрообладнання та його призначення включають наступні показники: надійність і безвідмовність роботи, вимоги щодо маси і габаритів, міцність електрообладнання, хімічна стійкість електрообладнання, простота експлуатації і ремонту електроустаткування, економічні вимоги [2].

Метою роботи є розгляд викликів сучасних викликів щодо впровадження ВДЕ до системи електропостачання ЛА.

Об'єктом дослідження є система електропостачання ЛА та ефективність її функціонування.

Предметом дослідження є технічні, економічні та екологічні аспекти інтеграції ВДЕ в енергосистему до системи електропостачання ЛА.

Основна частина

Між тим, від генераторів живиться вся електроніка на борту літального апарату, тому якщо генератори перестануть працювати, то знеструмиться і вся техніка електромережі ЛА. На цей випадок у деяких типах літальних апаратів виробники встановлюють висувні вітроенергетичні установки, які

виробляють струм за рахунок того, що вітроколесо крутиться під дією зустрічного потоку повітря на лопаті, що дає можливість хоча б відстежувати критично важливі технічні показники стану обладнання і системи ЛА [3].

На разі, ще одним із перспективних альтернативних джерел електричної енергії в умовах ЛА є сонячні батареї (СБ) [4]. Враховуючи, той факт, що СБ знайшли застосування в космонавтиці, де займають домінуюче положення серед інших джерел автономного електроживлення, можна говорити про подальше активне їх провадження в системи первинного аварійного електроживлення бортових комплексів ЛА, як додаткових джерел електричної енергії.

Враховуючи застосування нанотехнологій у виробництві СБ, є перспектива збільшення ефективності їх функціонування і в той же час суттєвого зменшення їх собівартості.

Також, є можливість ефективно накопичувати згенеровану СБ електричну енергію, що дасть можливість навіть на наявність мінливості погодних умов та стохастичності процесів генерування.

Висновки

Таким чином, встановлено, що впровадження відновлювальних джерел електричної енергії в системи електропостачання літальних апаратів має місце. Між тим перспективним та актуальним залишається питання впровадження ВДЕ в структуру первинного та аварійного живлення бортових комплексів літальних апаратів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Florin Jurca and Daniel Fodorean. Steady-state Analysis of Permanent Magnet Synchronous Machine for Integrated Starteralternator Applications. PIERS Proceedings, Prague, Czech Republic, July, 2015.
2. T. Shmelova, O. Kotov, S. Boiko, Modern aspects of application and development of Unmanned Aerial Vehicles Warsaw: iScience Sp. z.o.o. – 2021. – 139 p.
3. S. Boiko, Kasatkina I., Beridze T., Zhukov O., Nozhnova M. Aspects of implementation of intelligent control systems at infrastructure, energy and transport facilities Warsaw: iScience Sp. z.o.o. – 2024. – 204 p.
4. Бойко С., Касаткіна І., Берідзе Т., Жуков О., Бомбик В. Потенціал сонячної енергетики в умовах промислових агломерацій України // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2023. – № 4 (323). – С. 36–45. – DOI: 10.31891/2307-5732-2023-323-4-36-45

Бойко Сергій Миколайович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри транспортних технологій Національний університет «Запорізька політехніка», ел. пошта: boikosn2017@gmail.com

Жуков Олексій Анатолійович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів, Вінницький національний технічний університет, ел. пошта: alex4444_2004@ukr.net.

Іщенко Вероніка Русланівна – студентка групи ЕМСА-24б, факультет електроенергетики та електромеханіки, Вінницький національний технічний університет, ел. пошта: nikaisenko96@gmail.com

Boiko Serhii M. – Cand. Sci (Tech.), Associate Professor, Department of Transport Technologies, National University «Zaporizhzhia Polytechnic», e-mail: boikosn2017@gmail.com

Zhukov Oleksii A. – Cand. Sci (Tech.), Associate Professor, Department of Computerized Electromechanical Systems and Complexes, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: alex4444_2004@ukr.net

Ishchenko Veronika R. - student of group EMSA-24b, Faculty of Electrical Power Engineering and Electromechanics, Vinnytsia National Technical University, e-mail: nikaisenko96@gmail.com

ДО ПИТАННЯ ОЦІНКИ КОЕФІЦІЄНТА ВИКОРИСТАННЯ ВСТАНОВЛЕНОЇ ПОТУЖНОСТІ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

Вінницький Національний Технічний Університет

Анотація

Розглянуто значення коефіцієнта використання встановленої потужності (CF) для відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Показано, що його величина для сучасних сонячних та вітрових електростанцій коливається у межах 0,18-0,50. Запропоновано спрощену багатофакторну модель оцінки ефективності впровадження ВДЕ, що дозволяє враховувати технічні, природно-ресурсні та економічні чинники.

Ключові слова: відновлювані джерела енергії, коефіцієнт використання потужності, енергоефективність.

Abstract

The paper considers the capacity factor (CF) for renewable energy sources (RES). It is shown that its value for modern solar and wind power plants ranges between 0.18 and 0.50. A simplified multifactor model is proposed to assess the efficiency of RES implementation, taking into account technical, natural, and economic factors.

Keywords: renewable energy sources, capacity factor, energy efficiency.

Вступ

Впровадження відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) є складним і багатоетапним процесом. Сучасні системи електропостачання значною мірою залежать від традиційних енергоносіїв, отримання яких пов'язане з географією та зі шляхами їх постачання. ВДЕ частково вирішують цю проблему, оскільки дозволяють виробляти електроенергію ближче до споживача, незалежно від транспортної інфраструктури постачання карбонових носіїв [3]. Коефіцієнт використання встановленої потужності (Capacity Factor, CF) ВДЕ є одним із найважливіших показників при оцінці ефективності проєктів з впровадження відновлюваної енергетики. Він показує, яку частку від максимально можливої генерації реально виробляє установка протягом певного періоду.

Мета роботи – показати важливість врахування CF при впровадженні ВДЕ та запропонувати модель для прогнозування цього показника.

Об'єктом дослідження є процес виробництва електроенергії з відновлюваних джерел.

Предметом дослідження є залежність коефіцієнта CF від технічних, природних та економічних факторів.

Основна частина

Коефіцієнт CF визначається за формулою:

$$CF = \frac{E_{\text{факт}}}{P_{\text{вст}} \cdot T}, \quad (1)$$

де $E_{\text{факт}}$ – фактичний обсяг виробленої електроенергії за певний період часу, $P_{\text{вст}}$ – встановлена потужність, T – тривалість періоду (наприклад, 8760 год у році).

Базові довідкові значення CF для сучасних ВДЕ [1-2]: сонячна енергетика – 0,18-0,22; вітрова енергетика (оншор) – 0,28-0,38; вітрова енергетика (офшор) – 0,4-0,52. Такі значення приймають як «мінімальні» або гарантовані. При цьому, для перестраховки, при впровадженні ВДЕ прийнято брати нижню межу коефіцієнта встановленої потужності, близько 0,2.

Разом з тим, на значення CF впливає комплекс факторів: технічні характеристики обладнання, рівень сонячної інсоляції [4] чи вітрового потенціалу, пора року, втрати у електромережах, економічні чинники та обмеження, режими експлуатації тощо. Ці фактори можуть підвищувати або знижувати його величину.

Для їх урахування пропонується багатофакторна модель:

$$CF = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\alpha_i \cdot k_i) \quad (2)$$

де α_i – значення i -го фактора ($0 \dots 1$), k_i – коефіцієнт ваги факторів ($0 \dots 1$), n – кількість факторів.

Кожен фактор оцінюється окремо, наприклад:

$\alpha_{\text{тех}}$ – технічний стан інфраструктури, втрати у мережах, наявність доступного резерву і накопичувачів;

$\alpha_{\text{рес}}$ – рівень сонячної інсоляції чи вітрового потенціалу, пора року, погодні умови;

$\alpha_{\text{екоп}}$ – економічні умови (вартість електроенергії та обладнання, ціна закупки ВДЕ, рівень доступних фінансів).

Усереднення за кількістю факторів дозволяє нормувати показник CF у діапазоні від 0 до 1. Значення, ближче до 1, свідчить про високий рівень використання потужності ВДЕ і про сприятливі умови для їх впровадження.

Висновки

Коефіцієнт використання потужності (CF) є важливим показником ефективності впровадження ВДЕ. Запропонована модель дозволяє оцінювати прогнозоване значення CF, враховуючи технічні, ресурсні та економічні фактори. У сприятливих сценаріях і умовах прогнозоване CF може бути вищим за рекомендований мінімум, що підвищує точність прогнозів та збільшує ефективність впровадження ВДЕ.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Каталог критично важливих технологій для енергетичного сектору України [Електронний ресурс] / Міністерство енергетики України, Danish Energy Agency. – Київ, 2024. – 154 с. – Режим доступу: https://mev.gov.ua/sites/default/files/2024-02/udepp_urgent_technology_catalogue_for_ukrainian_power_sector_utc4upc_3.pdf
2. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України : [вид. 2-ге, оновл. та доповн.] / за заг. ред. С.О. Кудрі ; Інститут відновлюваної енергетики НАН України. – Київ, 2020. – 82 с. – ISBN 978-966-999-034-1. – Режим доступу: <https://ive.org.ua/wp-content/uploads/atlas.pdf>
3. Жуков О., Бойко С., Іщенко В. Енергоперехід та коригування енергетичного балансу: виклики та перспективи // Матеріали LIV науково-технічної конференції підрозділів Вінницького національного технічного університету (НТКП ВНТУ–2025), 24–27 червня 2025 р. : зб. доп. – Вінниця : ВНТУ, 2025. – С. 2717–2719. – ISBN 978-617-8163-48-8.
4. Бойко С., Касаткіна І., Берідзе Т., Жуков О., Бомбик В. Потенціал сонячної енергетики в умовах промислових агломерацій України // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2023. – № 4 (323). – С. 36–45. – DOI: 10.31891/2307-5732-2023-323-4-36-45

Жуков Олексій Анатолійович – канд. техн. наук, доцент кафедри комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів, Вінницький національний технічний університет, ел. пошта: alex4444_2004@ukr.net.

Киравчук Олександр Валерійович – студент групи ЕПА-24м, факультет електроенергетики та електромеханіки, Вінницький національний технічний університет, ел. пошта: usmp91@gmail.com

Zhukov Oleksii A. – Cand. Sci (Tech.), Associate Professor, Department of Computerized Electromechanical Systems and Complexes, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: alex4444_2004@ukr.net

Kylavchuk Oleksandr V. – student of group EPA-24m, Faculty of Electrical Power Engineering and Electromechanics, Vinnytsia National Technical University, e-mail: usmp91@gmail.com

О.А. Жуков¹
С. М. Бойко²
В. С. Гурківський¹

МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ З УРАХУВАННЯМ ДИНАМІЧНИХ ВТРАТ

¹Вінницький Національний Технічний Університет

²Національний Університет «Запорізька політехніка»

Анотація

Розглянуто сили опору руху електромобіля, включаючи силу тяжіння, аеродинамічний опір та опір кочення шин. Проаналізовано фактори, що впливають на прискорення та швидкість: потужність тягового двигуна, стан дорожнього покриття, аеродинаміку та масу транспортного засобу. Наведено узагальнену систему рівнянь з урахуванням моментів інерції та кутової швидкості для визначення потужності електродвигуна. Запропоновано аналітичний вираз ККД механічної трансмісії з врахуванням залежності від навантаження та швидкості. Акцентовано на практичному застосуванні моделі для оптимізації електроприводу.

Ключові слова: електромобіль, сили опору руху, тяговий електропривод, ККД трансмісії, моменти інерції.

Abstract

The forces of motion resistance acting on an electric vehicle are considered, including gravity, aerodynamic resistance, and tire resistance. The factors influencing acceleration and speed are analyzed: traction motor power, road surface condition, vehicle aerodynamics, and total mass. A generalized system of equations is presented, taking into account inertia moments and angular velocities to determine the motor power. The efficiency of the mechanical transmission is evaluated, depending on load and speed, with analytical expressions for losses proposed. Emphasis is placed on the practical application of the model for optimizing the electric drive.

Keywords: electric vehicle, motion resistance forces, traction electric drive, transmission efficiency, inertia moments.

Вступ

Розвиток електротранспорту вимагає точного моделювання динаміки руху для підвищення енергоефективності та автономності. Під час руху електромобіля на нього діють сили опору, такі як сила тяжіння, аеродинамічний опір та опір шин, які долаються за допомогою тягового електропривода. Прискорення та швидкість транспортного засобу залежать від потужності двигуна, стану дорожнього покриття, аеродинаміки та його маси. Особливо актуально це для руху на підйом, де втрати енергії зростають [1–2].

Метою роботи є розробка математичної моделі сил опору руху електромобіля з урахуванням динамічних моментів та динамічної зміни ККД трансмісії.

Об'єктом дослідження є процес руху електромобіля під впливом сил опору.

Предметом дослідження є математичні моделі тягового електроприводу, моменти інерції та ефективність трансмісії.

Основна частина

Сили, що діють на електромобіль під час руху на підйом [1–2], наведені на рисунку 1.

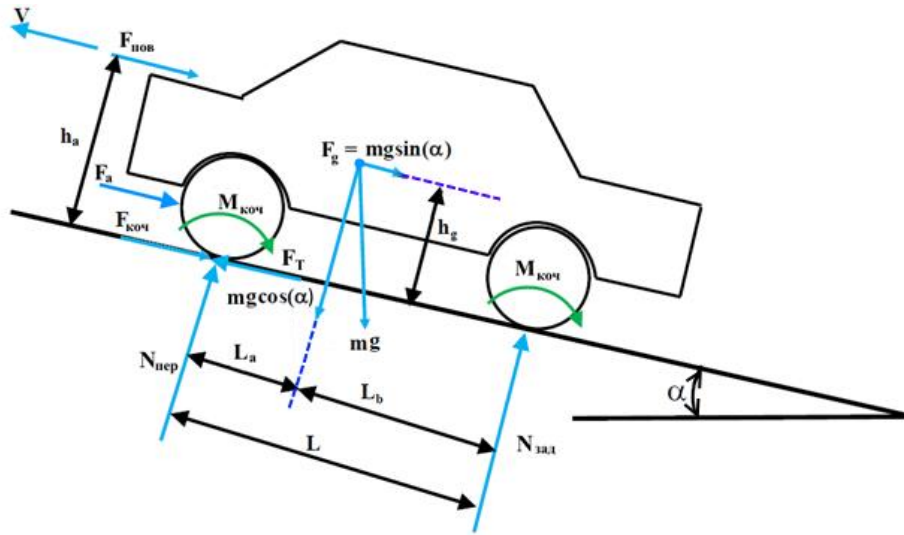


Рисунок 1 – Сили, що діють на електромобіль, який рухається на підйом

Узагальнена система рівнянь з урахуванням моментів інерції та кутових швидкостей має вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{\Sigma on} = 0,5 \cdot C_x \cdot \rho \cdot A \cdot V^2 + f_k \cdot mg \cdot \cos(\alpha) + mg \cdot \sin \alpha \\ M_T = F_{\Sigma on} \cdot R_k \\ M_{ст.дв} = \frac{M_T}{i \cdot \eta_{тр}} \\ J_{прив} = J_{дв} + \frac{J}{i^2} + m \frac{V^2}{\omega_{дв}^2} \\ M_{дин.дв} = J_{прив} \cdot \varepsilon = J_{прив} \cdot \frac{d\omega}{dt} \\ M_{сум.дв} = M_{ст.дв} + M_{дин.дв} \\ \omega_{дв} = \frac{V}{R_k} \cdot i \\ P_{дв} = M_{сум.дв} \cdot \omega_{дв} \end{array} \right. , \quad (1)$$

Система (1) дозволяє визначити необхідну потужність і кутову швидкість обертання валу тягового електродвигуна.

ККД механічної передачі трансмісії в загальному випадку [4] знаходиться за виразом:

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{a}{\gamma} + b}, \quad (2)$$

де a – коефіцієнт постійних втрат; b – коефіцієнт змінних втрат; γ – коефіцієнт навантаження, який для трансмісії електромобіля.

У електромобілі втрати залежать не лише від навантаження γ , а й від кутової швидкості вихідного валу ω (гідродинамічний опір, вентиляційні, стискання та перемшування мастила тощо). Виразимо їх через множник:

$$c(\omega) = \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^p, \quad p \in [1,6; 2,2], \quad (3)$$

де $\omega_{ном}$ – еталонне (номінальне) значення кутової швидкості.

ω – поточне значення кутової швидкості.

p – показник степеня підбирається на основі експериментальних даних.

З урахуванням швидкісної залежності (3):

$$\eta(\gamma, \omega) = \frac{1}{1 + \frac{a_0 \cdot c(\omega)}{\gamma} + b_0 \cdot \gamma}, \quad (4)$$

Для низьких швидкостей вводимо нижню межу:

$$c(t) = \max \left(\left(\frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^p \cdot c_{\min} \right). \quad (5)$$

Висновки

Запропонована модель при розрахунку потужності дозволяє оцінити сили опору та ККД трансмісії електромобіля, враховуючи динамічні фактори залежно від навантаження та від швидкості. Це сприяє оптимізації електроприводу, зменшенню втрат енергії та підвищенню запасу ходу. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на валідацію результатів моделювання на основі експериментальних даних.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Методичні вказівки до виконання практичних робіт з дисципліни «Електропривод транспортних засобів» зі спеціальності «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» [Електронний ресурс] / уклад.: О. А. Жуков, А. М. Коваль. – Вінниця : ВНТУ, 2025. – 81 с.
2. Ehsani M., Gao Y., Longo S., Ebrahimi K. M. Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles. – 3rd ed. – Boca Raton ; London; New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2018. – 573 p. – ISBN 978-1-4987-6177-2.
3. Основи теорії автомобілів та тракторів [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://vukladach.pp.ua/MyWeb/manual/agroinjenerija/traktoru_i_avtomobili_I%D0%86_g/traktoru_i_avtomobili_I%D0%86_g/8/8_1.htm
4. Бабій С. М., Мошноріз М. М., Проценко Д. П., Паянок О. А., Жуков О. А. Моделювання режимів роботи електропривода підйомної лебідки крана в середовищі MATLAB // Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences. – 2022. – № 313(5). – С. 99–107. – DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2022-313-5-99-107>
5. Рухомий склад міського електричного транспорту. Механічна частина : навч. посібник / В. Х. Далека, М. В. Хворост, В. І. Скуріхін, Д. І. Скуріхін ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. – 388 с.

Жуков Олексій Анатолійович – канд. техн. наук, доцент кафедри комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів, Вінницький національний технічний університет, ел. пошта: alex4444_2004@ukr.net.

Бойко Сергій Миколайович – канд. техн. наук, доцент кафедри транспортних технологій Національний університет «Запорізька політехніка», ел. пошта: boikosn2017@gmail.com

Гурківський Віктор Сергійович – студент групи ЕПА-24м, факультет електроенергетики та електромеханіки, Вінницький національний технічний університет, ел. пошта: hurkiwskoj@gmail.com

Zhukov Oleksii A. – Cand. Sci (Tech.), Associate Professor, Department of Computerized Electromechanical Systems and Complexes, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: alex4444_2004@ukr.net

Boiko Serhii M. – Cand. Sci (Tech.), Associate Professor, Department of Transport Technologies, National University «Zaporizhzhia Polytechnic», e-mail: boikosn2017@gmail.com

Hurkiwskoj Viktor S. - student of group EPA-24m, Faculty of Electrical Power Engineering and Electromechanics, Vinnytsia National Technical University, e-mail: hurkiwskoj@gmail.com

МОДЕЛЬ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ НАСОСНОЮ СТАНЦІЄЮ НА ЗАСАДАХ ТЕОРІЇ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Анотація

Розроблено модель системи керування насосною станцією на засадах теорії електричних кіл, що дозволяє ефективно аналізувати роботу системи, оптимізувати її параметри, своєчасно виявляти потенційні несправності та забезпечувати стабільну автоматизацію процесів.

Ключові слова: система керування, насосна станція, теорія електричних кіл, схема заміщення, автоматизація.

Abstract

A model of a pump station control system based on the theory of electric circuits has been developed, enabling effective analysis of system performance, optimization of its parameters, timely detection of potential faults, and ensuring stable process automation.

Keywords: control system, pump station, electric circuit theory, equivalent circuit, automation.

Вступ

Підвищення ефективності та оптимізація режимів роботи складних технічних систем, таких як насосна станція (НС) з електроприводними насосними агрегатами (НА), потребує розробки системи керування на основі моделей, здатних точно відтворювати складні взаємозв'язані фізичні процеси в системі.

Метою роботи є розроблення моделі системи керування насосною станцією на основі теорії електричних кіл для підвищення ефективності автоматизації, оптимізації параметрів роботи, своєчасного виявлення несправностей і забезпечення надійного та безперебійного її функціонування.

Результати дослідження

Моделі складних об'єктів у вигляді систем звичайних диференціальних рівнянь доцільно будувати з використанням системного підходу та єдиної теорії кіл шляхом синтезу схем заміщення окремих підсистем. Концепція системного підходу передбачає, що на етапі аналізу складну систему розділяють на підсистеми різної фізичної природи - електричну, механічну та гідравлічну. Кожну підсистему запропоновано замінити еквівалентним розрахунковим системним колом, що складається зі з'єднаних активних та пасивних елементів, через які генерується, трансформується, передається та споживається енергія. Такий підхід традиційно використовується для моделювання та розрахунку режимів роботи електричних кіл [1]. Застосування принципів теорії електричних кіл у механіці та гідравліці дозволяє трансформувати основні електричні рівняння у відповідні механічні та гідравлічні співвідношення. Це дає можливість створювати схеми кіл та аналізувати їх за допомогою тих самих методів, що й для електричних кіл.

На основі проведених досліджень встановлено, що особливої уваги заслуговують роботи щодо застосування теорії електричних кіл для аналізу режимів роботи гідравлічних машин, причому розрахунок параметрів схеми заміщення таких моделей здійснюється двома методами: аналітичним (з використанням конструктивних та каталогових даних машини) та експериментальним (на основі робочих характеристик, отриманих у ustalеному режимі роботи). Ці підходи слугували основою для представлення системи керування насосною станцією у вигляді інформаційної моделі [2], на базі якої в цьому дослідженні розроблено структурну схему моделі системи керування, наведеної на рис. 1. Модель системи керування НС представлена вихідними параметрами - групою Y (зокрема, значеннями тиску на виході з відцентрового насоса (ВН), витратами та віброшвидкостями у точках підшипникових опор насоса). Вхідні параметри описано факторами групи X , які не підлягають цілеспрямованому регулюванню. Вони впливають як на контрольовані величини (гідравлічний тиск та об'ємна витрата на вході в НС), так і на неконтрольовані (густина та в'язкість робочої рідини). До цієї групи також належать величини, що залишаються незмінними протягом усього процесу перекачування: типи ВН та приводного електродвигуна (ЕД), параметри трубопроводу, частота живлення статорної обмотки ЕД тощо.

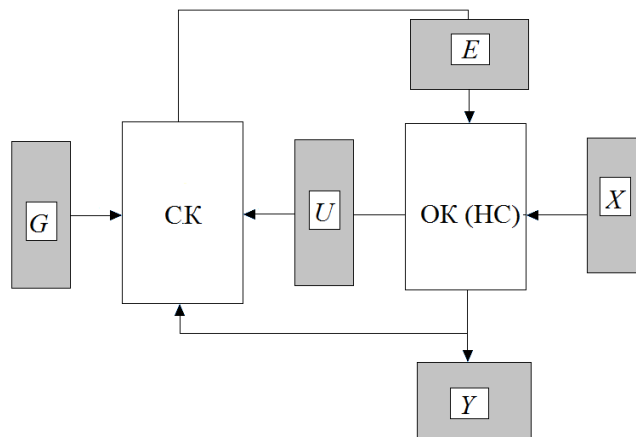


Рис. 1. Структурна схема моделі системи керування насосної станції

Окрім факторів X і Y , роботу НС визначають також фактори групи U . До цієї групи віднесено керовані вхідні величини, через які реалізується процес перекачування: кількість увімкнених НА, положення дросельовальних засувок на виході ВН, діаметри змінних робочих коліс ВН та струм збудження ротора ЕД. У випадку встановлення на НС регульованих НА, група U додатково включає напругу та частоту живлення статорних обмоток приводного ЕД. Інформація про поточні значення факторів груп U та Y надходить у систему керування, де вони порівнюються з параметрами групи G (оптимізовані характеристики НС, визначені методами багатоцільової оптимізації). У результаті система автоматизації формує керувальні дії, представлені факторами групи E (положення дросельовальних засувок на виході ВН та швидкість обертання роторів НА), які впливають на об'єкт керування.

Висновки

Розроблена модель системи керування НС на засадах теорії електричних кіл дозволяє аналізувати поведінку системи, оптимізувати її параметри, виявляти потенційні несправності та забезпечувати надійну автоматизацію роботи станції відповідно до заданих умов. Інтеграція розробленої системи в існуючу автоматизовану систему керування НС забезпечує узгодження керуючих програм диспетчерського пункту та їхню безперебійну роботу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Crapper E. H. Electric and Magnetic Circuits. – Legare Street Press, 2023. – 390 p.
2. Яремак І. І., Костишин В. С. Багатоцільова оптимізація усталених режимів роботи електроприводної нафтоперекачувальної станції // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. – 2018. – Т. 1, №108. – С. 15–21. – Режим доступу: <https://doi.org/10.30929/1995-0519.2018.1.15-21>.

Яремак Ірина Ігорівна — канд. техн. наук, доцент кафедри електричної інженерії, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, e-mail: yaremak_iryana@ukr.net

Yaremak Iryna I. — PhD in Engineering Sciences (Eng), Associate Professor of the Department of Electrical Engineering, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, e-mail: yaremak_iryana@ukr.net

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ТА МАШИННОГО ЗОРУ ДЛЯ ДІАГНОСТУВАННЯ ВАКУУМНИХ ВИМИКАЧІВ

¹Відокремлений структурний підрозділ «Вінницький фаховий коледж
Національного університету харчових технологій»,

²Вінницький національний технічний університет;

Анотація

Розглянуто підхід до підвищення надійності та безпеки електроенергетичних систем шляхом впровадження інтелектуальних методів діагностування вакуумних вимикачів. Проаналізовано обмеження традиційних методів контролю технічного стану та обґрунтовано доцільність використання технологій штучного інтелекту й машинного навчання для автоматичного розпізнавання дефектів і прогнозування ресурсу обладнання.

Ключові слова: вакуумний вимикач, надійність, штучний інтелект.

Abstract

An approach to improving the reliability and safety of power systems through the implementation of intelligent diagnostic methods for vacuum circuit breakers is considered. The limitations of traditional condition monitoring methods are analyzed, and the feasibility of using artificial intelligence and machine learning technologies for automatic defect detection and equipment lifetime prediction is substantiated.

Keywords: vacuum circuit breaker, reliability, artificial intelligence.

Вступ

Підвищення надійності та безпеки роботи електроенергетичних систем безпосередньо залежить від ефективності діагностування комутаційного обладнання, зокрема вакуумних вимикачів, що широко використовуються в розподільчих установках середньої напруги [1]. Традиційні методи контролю технічного стану ґрунтуються на аналізі електричних і часових параметрів — часу замикання та розмикання контактів, струмів, напруг, механічних коливань тощо. Проте вони характеризуються високою трудомісткістю, потребують участі оператора та не забезпечують достатньої точності для раннього виявлення дефектів і прогнозування ресурсу.

Результати дослідження

Сучасні тенденції розвитку енергетики вимагають переходу від реактивного обслуговування до прогнозно-аналітичних систем діагностування, що базуються на технологіях штучного інтелекту (ШІ) та машинного навчання [3]. Застосування методів машинного навчання дозволяє аналізувати великі обсяги даних, отриманих під час експлуатації вимикачів, виявляти приховані взаємозв'язки між параметрами та автоматично класифікувати технічний стан апаратів.

Нейронні мережі, методи кластеризації та дерева рішень можуть бути використані для розпізнавання типових дефектів: деградації контактної системи, порушення вакууму, зниження пружинного зусилля тощо. Такі алгоритми мають властивість самонавчання, що забезпечує підвищення точності діагностування в процесі накопичення даних.

Додаткове впровадження технологій машинного зору дозволяє здійснювати автоматизований візуальний контроль контактних груп, ізоляційних поверхонь та елементів дугогасильної камери [2]. Алгоритми сегментації зображень і розпізнавання дефектів забезпечують виявлення ознак підгоряння, тріщин, механічних пошкоджень, що є недосяжним для традиційних засобів контролю.

Поєднання методів штучного інтелекту та машинного зору формує нову концепцію інтелектуальної системи технічної діагностики, здатної не лише оцінювати поточний стан вимикачів, а й прогнозувати їхній залишковий ресурс. Це дає змогу мінімізувати аварійні відключення, підвищити ефективність експлуатації та оптимізувати витрати на технічне обслуговування [4].

Таким чином, інтеграція технологій штучного інтелекту та машинного зору у процеси технічного діагностування комутаційного обладнання відкриває нові можливості для розвитку інтелектуальних систем моніторингу в електроенергетиці. Реалізація таких рішень потребує створення

єдиної цифрової платформи збору, обробки та аналізу даних, що забезпечить взаємодію між сенсорними пристроями, системами керування та аналітичними модулями.

Перспективним напрямом подальших досліджень є розроблення комплексних моделей технічного стану вимикачів, які враховують не лише електричні, а й термомеханічні та вібраційні характеристики, що дозволить підвищити достовірність оцінювання. У довгостроковій перспективі застосування таких технологій сприятиме переходу до концепції Smart Grid, де ключовим елементом є самодіагностуюче електроенергетичне обладнання, здатне автономно виявляти несправності, прогнозувати термін служби та ініціювати технічне обслуговування. Це забезпечить підвищення ефективності управління.

Висновки

Отже, використання інтелектуальних технологій у процесах діагностування вакуумних вимикачів є перспективним напрямом розвитку сучасних систем моніторингу електроустаткування, що забезпечує перехід до концепції Smart Maintenance у галузі електроенергетики.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Грабко В. В., Дідушок О. В. Методи та засоби діагностування технічного стану вакуумних вимикачів : монографія [Електронний ресурс]. Вінниця : ВНТУ, 2022. 113 с.
2. Liu S., Bo X., Chen J. Investigation of vacuum arc modes in 252 kV single-break vacuum interrupters based on deep learning image recognition // Vacuum. – 2025. – Vol. 238. – Art. no. 114258. – DOI: 10.1016/j.vacuum.2025.114258.
3. Liu S., Bo X., Chen J. Investigation of vacuum arc modes in 252 kV single-break vacuum interrupters based on deep learning image recognition // Vacuum. – 2025. – Vol. 238. – Art. no. 114258. – DOI: 10.1016/j.vacuum.2025.114258.
4. Kang Zh., Zhang Ya., Du Yu. Application of multi-sensor information fusion technology in fault early warning of smart grid equipment // Energy Informatics. – 2024. – Vol. 7, art. 123. – DOI: 10.1186/s42162-024-00433-0.

Дідушок Олег Васильович – к.т.н., викладач відокремленого структурного підрозділу «Вінницький фаховий коледж Національного університету харчових технологій», Вінниця, didushok.oleh@vpcnuft.ukr.education

Бомбик Вадим Сергійович – к.т.н., старший викладач кафедри комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, vsbombyk@gmail.com

Didushok Oleh V. – PhD, lecturer at the detached structural subdivision "Vinnytsia Professional College of the National University of Food Technologies", Vinnytsia, didushok.oleh@vpcnuft.ukr.education

Bombyk Vadym Serhiyovych – PhD, senior lecturer at the Department of Computerized Electromechanical Systems and Complexes, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, vsbombyk@gmail.com

ВИКОРИСТАННЯ ВІБРОМОНІТОРИНГУ ДЛЯ АДАПТИВНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИМИ УСТАНОВКАМИ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У доповіді розглянуто проблему підвищення надійності та ефективності роботи електромеханічних систем шляхом впровадження адаптивного керування на основі вібромоніторингу. Проаналізовано основні причини виникнення вібрацій у механічних установках та наведено підходи до вимірювання віброзміщень за допомогою ємнісних сенсорів. Запропоновано структурну схему системи адаптивного керування виконавчим механізмом із зворотним зв'язком по швидкості та вібрації, що дозволяє своєчасно реагувати на зростання вібраційних параметрів. Обґрунтовано необхідність використання алгоритмів адаптивного регулювання, які автоматично коригують параметри керування залежно від поточного стану системи. Показано, що впровадження таких рішень забезпечує зменшення амплітуди вібрацій, підвищення ресурсу роботи обладнання та створює передумови для розвитку систем стан-орієнтованого технічного обслуговування.

Ключові слова: вібромоніторинг, сенсор віброзміщення, АСУТП, адаптивне керування, електромеханічна система.

Abstract

The article considers the problem of increasing the reliability and efficiency of electromechanical systems by implementing adaptive control based on vibration monitoring. The main causes of vibrations in mechanical installations are analyzed and approaches to measuring vibration displacements using capacitive sensors are presented. A structural diagram of an adaptive control system for an actuator with feedback on speed and vibration is proposed, which allows for a timely response to an increase in vibration parameters. The need for adaptive control algorithms that automatically adjust control parameters depending on the current state of the system is substantiated. It is shown that the implementation of such solutions provides a reduction in vibration amplitude, an increase in the equipment service life, and creates prerequisites for the development of condition-oriented maintenance systems.

Keywords: vibration monitoring, vibration displacement sensor, process control system, adaptive control, electromechanical system.

Вступ

В електромеханічних системах вібрація є одним із основних показників механічних несправностей установок. Зокрема, аналіз вібрацій дає змогу виявити такі типи дефектів:

- неспіввісність валів або муфт;
- нерівноваженість ротора, шківів чи крильчаток;
- зношення підшипників (ковзання або кочення);
- послаблення кріплень або люфти в опорах;
- дефекти зубчастих передач (сколи, нерівномірне зачеплення);
- дисбаланс або деформації обертових частин;
- резонансні явища у конструкції.

Тому, вібраційний аналіз — це ключовий метод діагностики механічних несправностей електромеханічних системах і комплексах. Завдяки вібромоніторингу можна виявити переважну більшість несправностей машини не зупиняючи її та не перериваючи технологічний процес, що дозволяє передбачити аварійні ситуації, прогнозувати планові ремонти та заощаджувати кошти підприємства [1]. Застосування таких систем дозволяє перейти від стратегії реактивного (за фактом відмови) обслуговування системи, до стан-орієнтованої (condition-based maintenance, CBM) та прогнозно-аналітичної (predictive maintenance, PdM) стратегії.

Традиційно, в системах вібромоніторингу використовують акселерометри які здійснюють вимірювання віброприскорення або віброшвидкості, однак варто зауважити, що даний метод має суттєві обмеження при застосуванні на тихохідних машинах. В діапазоні низьких обертів (до 1500 об/хв, що відповідає частоті коливань до 25 Гц) більш інформативним параметром стану є саме

віброзміщення. Тому в таких випадках для підвищення точності вібромоніторингу доцільно надавати переваги сенсорам віброзміщень [2].

У роботі «Математична модель вимірювального перетворення віброзміщення ємнісним сенсором в часовий інтервал» [2] описано структурну схему ємнісного сенсора і побудовано модель перетворення віброзміщення в часовий інтервал. Такий підхід дозволяє оптимізувати вимірювальне коло та зменшити похибку при отриманні цифрового коду, з якого визначається значення переміщення.

У статті «Вимірювальний канал віброзміщення з ємнісним сенсором» [3] розглянуто особливості реалізації мікроконтролерного каналу час-імпульсного перетворення, наведено рівняння перетворення і графіки залежності похибки квантування від значення віброзміщення. В результаті математичного моделювання встановлено, що верхня межа вимірювання віброзміщення ємнісним сенсором з мікропроцесорним вимірювальним каналом з нормованим значенням похибки квантування $\delta_{\text{кн}} \leq 0.6\%$ становить $a_{\text{max}} = 120 \cdot 10^{-6}$ м, а нижня межа при розрядності $n=10$ двійкового лічильника $a_{\text{min}} = 20 \cdot 10^{-6}$ м. Такі показники у повній мірі задовольняють метрологічні характеристики сучасних систем вібромоніторингу гідрогенераторів ГЕС і генераторів-двигунів ГАЕС та створюють передумови для впровадження таких вимірювальних каналів в електроенергетику України [3].

Відповідно до нормативних документів [4] розрізняють два види критеріїв оцінювання вібраційного стану машини, що поширюються на експлуатаційний контроль та приймальні випробування та призначені для оцінки рівнів вібрації машин різних типів. Критерій 1 пов'язаний із значеннями вимірюваних параметрів вібрації, тобто визначають межі для абсолютного значення параметра вібрації, що відповідають допустимим динамічним навантаженням на підшипники та допустимій вібрації, що передається зовні через опори та фундамент. І відповідно до цих даних визначають до якої з 4-х зон відноситься установка (А, В, С, D).

В свою чергу 2-й критерій пов'язаний зі змінами значень вібрації (незалежно від напрямку змін). Тобто проводиться оцінка зміни значення параметра вібрації в порівнянні з попередньо встановленим еталонним значенням усталеному в режимі роботи машини. Як правило, для машин, призначених для тривалої експлуатації, встановлюють граничні рівні вібрації, перевищення яких в нормальному режимі роботи машини, призводить до подачі сигналів ПОПЕРЕДЖЕННЯ або ЗУПИНКА [4].

Основна частина

На сьогоднішній день найактуальнішим варіантом реалізації системи вібромоніторингу на підприємстві є створення комплексу апаратного та програмного забезпечення, інтегрованого у загальну архітектуру АСУТП (автоматизованої системи управління технологічним процесом), що забезпечує безперервний контроль параметрів вібрації технологічного обладнання з видачою аварійних сигналів попередження чи зупинки технологічного процесу підприємства, а також здійснює прогнозування стану контрольованого обладнання на основі вимірянних даних [5].

Очевидно, що у випадку перевищення порогового значення вібраційного сигналу рівня ПОПЕРЕДЖЕННЯ слід не лише сповістити оператора, а й змінити режим роботи електромеханічної установки відповідно до нових умов, замість продовження експлуатації у попередньому режимі, перейти на більш ощадний режим роботи щоб призупинити або сповільнити подальший розвиток несправностей.

Тому виникає необхідність застосувати адаптивне керування електромеханічною установкою з урахуванням сигналу вібрації, тобто використовувати сигнал віброзміщення як зворотний зв'язок у схемі керування (наприклад PID або адаптивний регулятор). Наприклад, якщо сигнал віброзміщення перевищує допустимий поріг, система може змінити частоту обертання для зниження коливань. Використовуючи модель динаміки системи (ротор — підшипники — корпус), можна прогнозувати вплив зміни параметрів керування на вібраційний режим. На рис. 1 показано спрощена структурна схема системи адаптивного керування умовним виконавчим механізмом через регулятор зі зворотнім зв'язком по швидкості та вібрації.

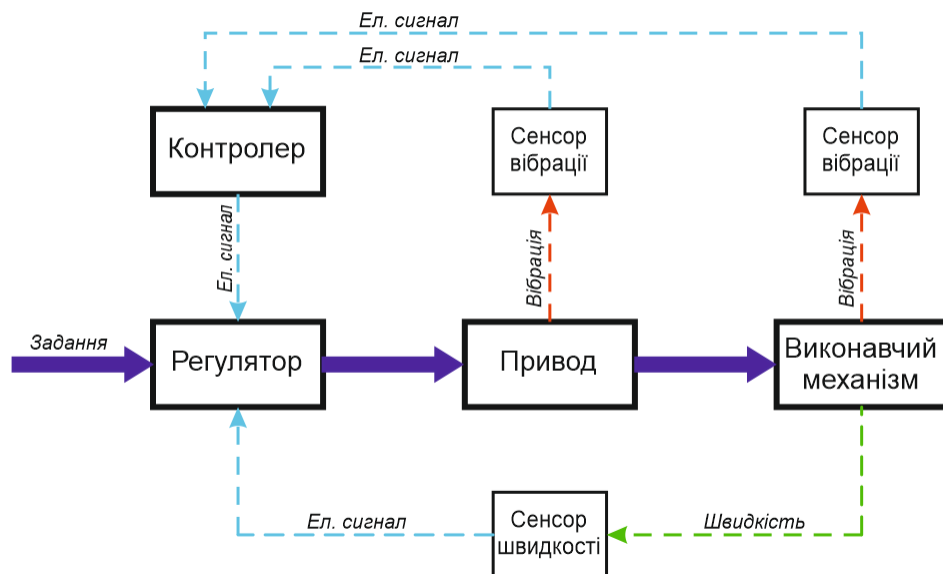


Рис. 1. Структурна схема системи адаптивного керування виконавчим механізмом зі зворотнім зв'язком по швидкості та вібрації.

Опис роботи системи адаптивного керування виконавчим механізмом зі зворотнім зв'язком вібрації:

- вмісний сенсор вимірює рівень віброзміщення на корпусі установки, редуктора або підшипникового вузла та генерує аналоговий сигнал до вимірювального каналу;
- вимірювальний канал перетворює віброзміщення в часовий інтервал та цифровий код;
- контролер опрацьовує сигнал віброзміщення отриманий від сенсора відповідно до закладеного алгоритму та корегує коефіцієнти ПІД-регулятора або подає на нього керувальні дії;
- електропривід (інвертор + двигун) виконує керуючі сигнали контролера та подає обертовий момент на виконавчий механізм;
- виконавчий механізм, що має власну динаміку, генерує вібрації, які знову фіксує сенсор.

Використовуючи модель динаміки системи (ротор — підшипники — корпус), можна прогнозувати вплив зміни параметрів керування на вібраційний режим.

Основна ідея полягає в тому, щоб пригасити розвиток коливань на ранній стадії, не допускаючи переходу системи в режим розгойдування. Це дозволяє установці зберігати стійкість та продовжувати роботу навіть за наявності зовнішніх збурень або дисбалансів.

Для реалізації цієї функції необхідно застосувати алгоритм адаптивного керування з урахуванням поточного рівня віброзміщення, який забезпечує автоматичну зміну параметрів регулятора залежно від динамічних характеристик системи. Такий алгоритм повинен включати виявлення перевищення контрольних порогів вібрації, оцінювання швидкості зміни амплітуди коливань, а також механізм корекції керуючих впливів з метою приглушення резонансних процесів.

Крім того, доцільно реалізувати фільтрацію сигналів сенсора віброзміщення (зокрема за допомогою вейвлет-фільтра), що дозволить підвищити точність визначення поточного стану системи та ефективність адаптивного регулювання.

До потенційних переваг впровадження системи адаптивного керування виконавчим механізмом зі зворотнім зв'язком по вібрації можна віднести наступні:

- зниження амплітуди вібрацій в робочому режимі, що призведе до зменшення механічних навантажень та підвищення ресурсу;
- покращення якості роботи без необхідності жорсткого механічного балансування чи демпфування певний період часу;
- можливість коректного керування навіть при невеликих частотах обертання, де прискорення дає слабкий сигнал.

Однак слід враховувати низку обмежень і викликів, що впливають на точність та стабільність роботи. Зокрема, похибка квантування під час перетворення часу в імпульсний сигнал обмежує діапазон достовірного вимірювання. Додатковими факторами, що знижують надійність сигналу, є вплив шумів та температурний дрейф. Крім того, затримки під час обробки сигналу, пов'язані з цифруванням і фільтрацією, можуть погіршувати динамічну реакцію системи керування. Важливим аспектом також є урахування нелінійностей і власної динаміки електромеханічної системи, які визначають ефективність реалізації адаптивного алгоритму.

Висновки

Вібраційний аналіз є ефективним методом ранньої діагностики несправностей електромеханічних систем без зупинки технологічного процесу.

Для тихохідних машин найбільш інформативним параметром контролю є віброзміщення, що доцільно вимірювати за допомогою ємнісних сенсорів.

Система адаптивного керування з урахуванням сигналу вібрації дозволяє автоматично змінювати режим роботи установки, запобігаючи розвитку резонансних процесів.

Використання зворотного зв'язку по віброзміщенню та швидкості забезпечує стабільність роботи системи, зменшує амплітуду коливань і продовжує строк служби обладнання.

Реалізація алгоритмів адаптивного керування потребує врахування похибок вимірювання, часових затримок та нелінійностей системи, але їх застосування відкриває перспективи створення інтелектуальних систем технічного діагностування та прогнозного обслуговування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. О.В. Осельський, В.В. Кухарчук, «Засоби вимірювання вібросигналів електромеханічних систем і комплексів в умовах виробництва», Матеріали ЛІП науково-технічної конференції підрозділів Вінницького національного технічного університету (НТКП ВНТУ–2024) : збірник доповідей [Електронний ресурс]. – Вінниця : ВНТУ, 2024. – (PDF, 2774 с.).
2. О.В. Осельський, В.В. Кухарчук, "Математична модель вимірювального перетворення віброзміщення ємнісним сенсором в часовий інтервал ", Фахове видання МОНУ Вісник Вінницького політехнічного інституту, №2 (173), с. 6-13, 2024. Doi*: 10.31649/1997-9266-2024-173-2-6-13
3. О.В. Осельський, В.В. Кухарчук, "Вимірювальний канал віброзміщення з ємнісним сенсором", Фахове видання МОНУ Вісник Вінницького політехнічного інституту, №2 (179), 2025. Doi*: 10.31649/1997-9266-2025-179-2
4. ДСТУ ГОСТ ИСО 10816-1:2014 Вібрація. Контролювання стану машин за результатами вимірювання вібрації на необертюваних частинах. Частина 1. Загальні вимоги.
5. О.В. Осельський, "Особливості проектування сучасної системи вібромоніторингу у складі асупт виробничого підприємства", на Всеукраїнській науково-практичній інтернет-конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2025), 2025.

Осельський Олександр В'ячеславович – аспірант кафедри комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів, Вінницький національний технічний університет, Вінниця; провідний інженер з автоматизованих систем керування виробництвом, ТОВ «КСК-Автоматизація» Вінницька філія, м. Вінниця, e-mail: oselskyi.ov@gmail.com

Василь Васильович Кухарчук - професор, д.т.н., професор кафедри комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів, Вінницький національний технічний університет, Вінниця.

Науковий керівник: **Василь Васильович Кухарчук** - професор, д.т.н., професор кафедри комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів, Вінницький національний технічний університет, Вінниця.

Oselskyi Oleksandr V – postgraduate Department of computerized electromechanical systems and complexes, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia; leading engineer for automated production control systems, «CSC-Automation» Ltd Vinnytsia branch, Vinnytsya, e-mail: oselskyi.ov@gmail.com

Vasyl V Kukharchuk - Professor, Dr Sc. (Eng.), Professor of the Department of computerized electromechanical systems and complexes, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.

Supervisor: **Vasyl V Kukharchuk** - Professor, Dr Sc. (Eng.), Professor of the Department of computerized electromechanical systems and complexes, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.

ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ МОСТОВОГО КРАНУ ІЗ ВРАХУВАННЯМ КОЛИВАНЬ ВАНТАЖУ

¹Вінницький Національний Технічний Університет

Анотація

Розроблено підхід до створення удосконаленої системи керування електроприводом мостового крана, що забезпечує зменшення коливань вантажу. Система ґрунтується на використанні коригувального зворотного зв'язку за кутом відхилення вантажу. При цьому зворотний зв'язок реалізовано у вигляді пропорційної залежності з коефіцієнтом підсилення, який змінюється відповідно до довжини підвісу. Значення довжини визначається опосередковано — за інформацією, отриманою від датчика кута відхилення вантажу.

Ключові слова: електропривод мостового крана, система керування, коливання вантажу, зворотний зв'язок, коефіцієнт підсилення, сенсор кута відхилення.

Abstract

A method for implementing an improved control system of an overhead crane electric drive aimed at damping load oscillations is proposed. The system is based on the application of a corrective feedback loop using the load swing angle. The feedback has a proportional structure with a variable gain coefficient that depends on the hoisting rope length. The rope length is determined indirectly based on the data obtained from the load swing angle sensor.

Keywords: overhead crane electric drive, control system, load oscillations, feedback, gain coefficient, swing angle sensor.

Вступ

Робота мостового крана супроводжується механічними коливаннями вантажу на гнучкому підвісі, що збільшує час навантажувально-розвантажувальних операцій, викликає додаткові циклічні навантаження в системі електроприводів механізмів підйому, переміщення крана і його механізмів та ускладнюють завдання позиціонування вантажу [1].

На стадії проектування механічного та електричного обладнання мостового крана одним із головних факторів, що обмежують максимальні робочі швидкості механізмів переміщення, є розкачування вантажу.

При дослідженні механізмів переміщення мостового крана встановлено, що при роботі крана виникають додаткові пружні динамічні навантаження, які можуть перевищувати статичні навантаження, що діють на них. Додаткову навантаження створюють вимушені коливання підвішеного вантажу. Вони мають меншу величину, ніж пружні коливання в механічних зв'язках, однак впливають на рівномірність ходу механізму переміщення, на зручність експлуатації крана, а також на точність позиціонування вантажу [2].

Розробкою системи демпфування коливань підвішеного вантажу в даний час займаються великі світові машинобудівні компанії, такі як Siemens, Demag, ABB, Konecranes, Schneider Electric. Вітчизняні виробники кранового електрообладнання практично не мають розробок у даній області.

Метою роботи є підвищення продуктивності мостового крана за рахунок демпфування коливань підвішеного вантажу шляхом удосконалення системи управління електроприводами мостового крана.

Основна частина

Демпфування коливань вантажу мостового крана дозволяє [3]:

1. знизити амплітуду і тривалість розкачування вантажу, що призводить до збільшення продуктивності роботи мостового крана за рахунок часу навантажувально-розвантажувальних робіт і підвищення точності відпрацювання траєкторії переміщення вантажу крана;

2. збільшити термін служби електричного та механічного обладнання мостового за рахунок зниження циклічних навантажень на електромеханічну систему, викликаних механічними коливаннями вантажу;

3. збільшити продуктивність роботи мостового крана за рахунок збільшення робочих швидкостей механізмів переміщення.

Таким чином, удосконалення системи управління електроприводами мостового крана для демпфування коливань, що приводить до збільшення продуктивності крана та термінів служби, є актуальною науково-технічною задачею[4].

В результаті проведених досліджень запропоновано порівняльний аналіз чотирьох способів реалізації системи управління електроприводами (СУЕП) для усунення розкачування вантажу[5]. На основі положень теорії автоматичного управління побудована структурна модель двомасової системи мостового крана з гнучким підвісом. В основі цієї моделі закладений жорсткий негативний зворотний зв'язок по куту відхилення вантажу від вертикальної осі для збільшення еквівалентного коефіцієнта демпфування замкнутої системи управління. Для реалізації системи управління передбачено пряме вимірювання кута відхилення вантажу. Виконання завдань визначення кута відхилення вантажу здійснюється із застосуванням вібраційного гіроскопа.

Основним компонентом вдосконаленої СУЕП механізму переміщення для демпфування коливального навантаження є сенсор кута відхилення навантаження з незалежним електропостачанням. Сенсор встановлюється на крюк, трос або в інше відповідне за умовами роботи місце на механізмі гнучкого підвісу і передає дані щодо поточні відхилення вантажу через безпроводні протоколи передачі даних. Створення апаратної частини та вимоги до технічних компонентів системи обумовлені дослідженнями на комп'ютерній моделі.

Висновки

Запропоновано підхід до реалізації вдосконаленої системи управління електропривода мостового крана для демпфування коливань вантажу, яка побудована на застосуванні коригувального зворотного зв'язку за кутом відхилення вантажу. Зворотний зв'язок має структуру пропорційного зв'язку зі змінним коефіцієнтом підсилення в залежності від довжини підвісу, який визначається опосередкованим способом на основі даних від сенсора кута відхилення вантажу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

10. Закладний, О. М. Електропривод: підручник. Харків: НТУ «ХПІ», 2020. 412 с.
11. Волянюк, В. О., Сухомлин, О. П. Підйомно-транспортні машини та системи: навчальний посібник. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2021. 356 с.
12. Tang, W., Song, Z., Zhang, Y., & Zhang, J. Optimization-Based Input-Shaping Swing Control of Overhead Cranes. *Applied Sciences*, 2023, vol. 13, no. 21.
13. Yu, Z., Li, W., Zhang, Y., & Tang, H. Research on Swing Model and Fuzzy Anti-Swing Control Technology of Bridge Crane. *Machines*, 2023, vol. 11, no. 12.
14. Jensen, K. J., & Johansen, T. A. Anti-Swing Control of a Hydraulic Loader Crane with Nonlinear Dynamics. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2021, vol. 26, no. 4, pp. 1760–1771.

Сівохін Сергій Денисович — ст. гр. ЕПА-24м, факультет Електроенергетики та електромеханіки, Вінницький національний технічний університет, ел. пошта: sivohinsergiy016@gmail.com.

Нанак Олена Миколаївна — канд. техн. наук, доцент кафедри комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів, Вінницький національний технічний університет, ел. пошта: e_nanaka@ukr.net.

Паянок Олександр Анатолійович — канд. техн. наук, доцент кафедри комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів, Вінницький національний технічний університет, ел. пошта: opayanok@gmail.com.

Науковий керівник: **Нанак Олена Миколаївна** — канд. техн. наук, доцент кафедри комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця.

Sivohin Serhiy Denysovych — student of the group EPA-24m, Faculty of Electrical Power Engineering and Electromechanics, Vinnytsia national technical university, e-mail: sivohinsergiy016@gmail.com.

Nanaka Olena Mykolaivna — PhD, Associate Professor of the Department of computerized electromechanical systems and complexes, Vinnytsia national technical university, e-mail: e_nanaka@ukr.net.

Payanok Oleksandr Anatoliyovych — PhD, Associate Professor of the Department of computerized electromechanical systems and complexes, Vinnytsia national technical university, e-mail: opayanok@gmail.com.

Scientific advisor: **Nanaka Olena Mykolaivna** — PhD, Associate Professor of the Department of computerized electromechanical systems and complexes, Vinnytsia national technical university, Vinnytsia.

МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНХРОННОГО ДВИГУНА В ПУСКОВИХ АСИНХРОННИХ РЕЖИМАХ

¹ Вінницький національний технічний університет;

² КЗ «Вінницька гімназія №24»

Анотація

У роботі розглянуто особливості пускових асинхронних режимів роботи синхронних двигунів великої потужності. Проведено аналіз впливу активного опору в колі збудження на величину пускових та максимальних моментів двигуна. Запропоновано методику побудови механічних характеристик у пускових режимах, що дозволяє оцінити ефективність використання додаткових пускових резисторів для обмеження струмів і механічних перевантажень. Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення систем пуску синхронних електроприводів.

Ключові слова: синхронний двигун, електропривод, пусковий струм.

Abstract

The paper considers the features of the starting asynchronous modes of operation of high-power synchronous motors. The analysis of the influence of active resistance in the excitation circuit on the magnitude of the starting and maximum torques of the motor is carried out. A method for constructing mechanical characteristics in starting modes is proposed, which allows assessing the effectiveness of using additional starting resistors to limit currents and mechanical overloads. The results obtained can be used to improve the starting systems of synchronous electric drives.

Keywords: synchronous motor, electric drive, starting current.

Вступ

Синхронні двигуни широко застосовуються в різних галузях промисловості, транспорті та технологічних процесах завдяки своїм перевагам і технічним характеристикам. До основних з них належать висока точність регулювання швидкості обертання, значна ефективність та високий коефіцієнт потужності. Крім того, здатність двигунів регулювати реактивну потужність у широкому діапазоні робить їх зручними для використання як приводи насосного та вентиляційного обладнання середньої й великої потужності в різних сферах виробництва. Зокрема, у нашому регіоні синхронні двигуни часто застосовують у системах електропостачання підприємств цукрової промисловості — наприклад, для приводу водокільцевих насосів, які створюють розрідження у вапнякових печах і відкачують сатураційні гази для технологічних потреб.

Потужність таких приводів зазвичай складає 300-500 кВт й вони живляться напругою 6 кВ та запускаються в рух в асинхронному режимі. Такі пускові режими синхронних двигунів, що разом із ротором насоса мають значний момент інерції, можуть супроводжуватися значними пусковими струмами та механічними перевантаженнями елементів кінематичної схеми, зокрема редукторів. В роботі [1] була запропонована структурна схема системи пуску та керування збудженням синхронного двигуна, яка передбачала можливість замикання обмотки збудження на різні за значенням пускові резистори в ході його запуску, чим планувалось обмежувати пускові режими. Але реалізація таких режимів передбачає окремих теоретичних досліджень для оцінки ефективності запропонованого способу перед впровадженням на реальному об'єкті.

Метою пропонованої роботи є побудова механічних характеристик синхронного двигуна в пускових асинхронних режимах, що дозволить оцінити вплив опору пускових резисторів на обмеження пускових перевантажень.

Основна частина

Пуск синхронних двигунів відрізняється в залежності від особливостей технологічного процесу, в

якому бере участь електропривод [2-4]. Для двигунів потужністю від 100 до 500 кВт здебільшого використовується асинхронний пуск з безпосереднім включенням на напругу живлення. Такі синхронні двигуни мають явнополосний ротор утворений обмоткою збудження та додаткову пускову обмотку, виконану у вигляді білячої клітки. Такий ротор в асинхронному режимі не є симетричним як у звичайних асинхронних машин. Тому для аналізу таких режимів схему заміщення необхідно подати у вигляді двох схем – одну для повздовжньої d-осі та поперечної q-осі ротора (рис. 1).

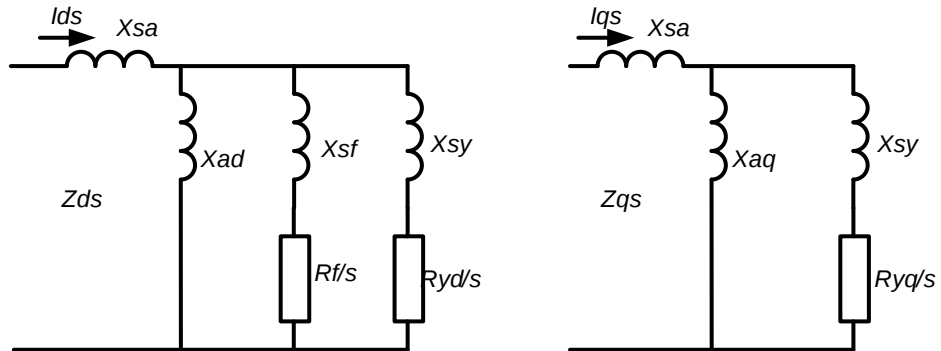


Рисунок 1 Схеми заміщення синхронного двигуна в асинхронному режимі по повздовжній (ліворуч) та поперечній осях

На схемах рис. 1: X_{sa} – індуктивність розсіювання статорної обмотки; X_{ad} , X_{aq} – складові основної індуктивності статорної обмотки в повздовжній та поперечних осях відповідно; X_{sy} – індуктивність обмотки збудження; X_{sy} – індуктивність пускової обмотки ротора; R_f – активний опір обмотки збудження, що включає у себе опір обмотки збудження та опір пускового резистора; R_{xd} , R_{yq} – складові активного опору пускової обмотки в повздовжній та поперечних осях відповідно.

Відповідно до рисунків 1 повздовжній та поперечний струми якоря в асинхронному режимі:

$$I_{ds} = \frac{U}{Z_{ds}}, \quad I_{qs} = \frac{-jU}{Z_{qs}}, \quad (1)$$

де U – фазна напруга, Z_{ds} та Z_{qs} – комплексні опори схем заміщення у повздовжній та поперечній осях відповідно визначені з врахуванням схем рис. 1.

Оскільки $Z_{ds} \neq Z_{qs}$, то струми I_{ds} та I_{qs} складають несиметричну двофазну систему і їх можна розкласти на струми прямої і зворотної послідовності:

$$\begin{cases} I_1 = \frac{I_{ds} + jI_{qs}}{2} = \left(\frac{1}{Z_{ds}} + \frac{1}{Z_{qs}} \right) \frac{U}{2} \\ I_2 = \frac{I_{ds} - jI_{qs}}{2} = \left(\frac{1}{Z_{ds}} - \frac{1}{Z_{qs}} \right) \frac{U}{2} \end{cases} \quad (2)$$

Таким чином опір схеми заміщення прямої послідовності:

$$Z_1 = \frac{U}{I_1} = \frac{Z_{ds}Z_{qs}}{2(Z_{ds} + Z_{qs})} \quad (3)$$

Визначений таким способом опір прямої послідовності можна використати для спрощеного визначення максимального та пускового механічного моменту синхронного двигуна в асинхронному режимі, а також для побудови механічної характеристики за допомогою уточненої формули Клосса:

$$M(s) = M_{\max} \frac{2 + q}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + q}, \quad (4)$$

де

$$M_{\max} = \frac{U^2}{2 \cdot \omega_0} \frac{R_2'}{Z_1}, \quad (5)$$

де $R_2' = \text{Re}(Z_1)$.

Варто зазначити, що оскільки у схемах рис. 1 присутній активний опір кола збудження R_f , то побудована за таким підходом значення максимального (вираз 5) та пускового ($M(s=1)$) вираз (4) можна побудувати у залежності від R_f (рис.2).

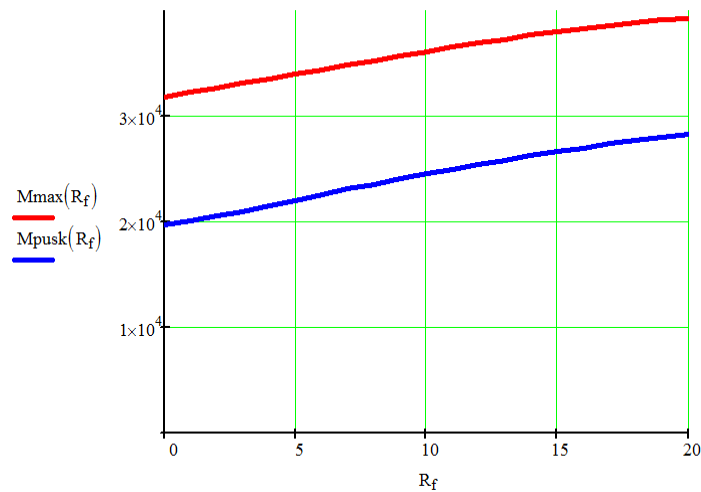


Рисунок 2 Залежність максимального та пускового моменту синхронного двигуна в асинхронному режимі від активного опору у колі збудження

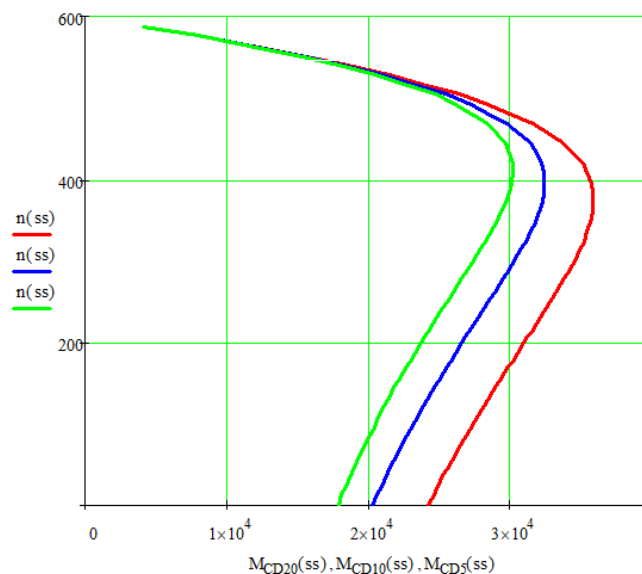


Рисунок 3 Механічні характеристики синхронного двигуна в асинхронному режимі за різних значеннях активного опору у колі збудження

На рисунку 3 червоною лінією зображено механічну характеристику з опором додаткового пускового резистора у колі ротора рівним 20 Ом, синьою – 10 Ом, зеленою – 5 Ом.

Аналіз побудованих залежностей дозволяє зробити висновок, що при зменшенні активного опору в колі збудження пусковий та максимальний моменти двигуна зменшуються. Отже, обмеження пускових режимів роботи синхронних двигунів можна здійснювати зменшенням пускових реостатів, що підключаються послідовно до обмотки збудження у ході асинхронного пуску. Найнижче значення опору пускового резистора необхідно визначати з міркувань його допустимого струму, а також допустимих струмів обмотки збудження та силових напівпровідникових ключів, що здійснюють комутації в ході пуску. Також важливим є перевірка достатності пускового моменту двигуна для пуску відповідного механізму.

Варто зазначити, що такий спосіб розрахунку та побудови механічних характеристик є наближеним, оскільки не в повній мірі враховує активний опір статорної обмотки та не враховує механічні моменти, які спричиняють струми зворотної послідовності. Оцінка ступеня адекватності такого підходу та

відповідності отриманих результатів практичним даним вимагають додаткових теоретичних та експериментальних досліджень

Висновки

Отже, у роботі показано, що пуски синхронних двигунів значної потужності супроводжуються значними механічними перевантаженнями та пусковими струмами. Проаналізовано, від яких параметрів залежить пусковий струм синхронного двигуна й на основі цього аналізу запропоновано шляхи полегшення пускових режимів. Найбільш економічно доцільним визначено введення в роторне коло додаткового резистора, що обмежуватиме пусковий струм. Зменшення опору пускового резистора призводить зменшення пускового та максимального моменту двигуна. Визначено перелік завдань, що вимагають подальших досліджень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Коваль А. М., Машуков М. Ю. «Модернізація системи пуску та керування збудженням синхронного двигуна» в матеріалах конференції "Науково-технічна конференція підрозділів Вінницького національного технічного університету (НТКП ВНТУ)", Вінниця, 2024 [Електронний ресурс]
2. Електричні машини і трансформатори / Підручник за заг. Ред. В. І. Мілих. – Х.: ХП, 2017. – 452 с.
3. Андрієнко В.М., Куєвда В.П. Електричні машини: Навч. Посіб. – К.: НУХТ, 2010. – 366 с. ISBN
4. Теорія електропривода: Підручник/ За ред. М.Г.Поповича. – К.: Вища школа, 1993. – 494 с.

Коваль Андрій Миколайович — кандидат технічних наук, старший викладач кафедри комп'ютерних електромеханічних систем та комплексів, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: koval.a.m@vntu.edu.

Машуков Максим Юрійович — студент гр. ЕМ-22 мс, Вінницький національний технічний університет, Вінниця.

Коваль Тетяна Миколаївна – вчитель, КЗ «Вінницька гімназія №24», Вінниця

Andriy M. Koval— Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of the Department of Computer Electric Electric Systems and Complexes, Vinnytsia National Technical University, Vinnitsa, E-mail: koval.a.m@vntu.edu.

Maksym Y. Mashukov - Student of EM-22ms group, Vinnytsia National Technical University, Vinnitsa, E-mail: maxmashykov@gmail.com

Tetiana M. Koval - teacher, Vinnytsia Gymnasium №24, Vinnytsia

ДО ПИТАННЯ ОЦІНКИ СТАНУ ІЗОЛЯЦІЇ РОТОРА ПРАЦЮЮЧОГО ТУРБОГЕНЕРАТОРА ТЕПЛОВІЗІЙНИМИ МЕТОДАМИ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Для контролю роботоздатності турбогенератора застосовуються відомі методи і засоби. Особливою є задача виявлення місця потенційного підвищення температури в пазу обмотки ротора турбогенератора в процесі його роботи. Пропонується підхід, яким передбачається вимірювання температури в лобових частинах ротора. Місце можливого пошкодження ізоляції визначається відповідно до розподілу температури вздовж провідника у разі виникнення джерела виділення тепла. По отриманих значеннях за розробленою математичною моделлю можливо оцінити розташування місця підвищеної температури, а отже, і місце можливого пошкодження ізоляції провідника в пазу ротора.

Ключові слова: ротор турбогенератора, ізоляція обмоток, розподіл температури, тепловізійні методи.

Abstract

Known methods and means are used to control the operability of a turbogenerator. A special task is to identify the location of a potential temperature increase in the slot of the rotor winding of a turbogenerator during its operation. An approach is proposed that involves measuring the temperature in the frontal parts of the rotor. The location of possible insulation damage is determined according to the temperature distribution along the conductor in the event of a heat source. Based on the obtained values, the developed mathematical model allows us to estimate the location of the elevated temperature, and therefore the location of possible insulation damage to the conductor in the rotor slot.

Keywords: turbogenerator rotor, winding insulation, temperature distribution, thermal imaging methods.

Відомо, що надійність роботи турбогенератора залежить від його роботоздатності. Для оцінки технічного стану застосовуються методи та засоби, які передбачають дослідження робочого стану турбогенераторів неперервно в процесі експлуатації або під час виведення їх з роботи для проведення профілактичних оглядів або поточних ремонтів [1].

Особливістю функціонування турбогенератора є те, що його ротор обертається з великою швидкістю і в робочому стані визначати стан ізоляції обмоток ротора є непростю задачею. Не менш складною є задача виявлення місця потенційного пошкодження ізоляції в провіднику ротора працюючого турбогенератора.

В даній роботі запропоновано підхід, згідно з яким пропонується вимірювати температуру ізоляції в лобових частинах ротора з використанням спеціальних тепловізійних засобів, наприклад типу [2], і за розробленою математичною моделлю визначати місце з потенційно підвищеною температурою. За вимірними значеннями температури кожного провідника ротора відповідно до математичної моделі передбачено відтворення розподілу температури вздовж провідника, виявлення точки найвищої температури і таким чином визначається місце виникнення підвищеної температури, обумовленої можливим пошкодженням ізоляції.

Таку реалізацію розв'язання задачі оцінювання місця потенційного пошкодження ізоляції ротора турбогенератора можна вважати альтернативною і її можливо застосувати в системі моніторингу турбогенератора як додаткову для підвищення достовірності оцінки його роботоздатності.

Висновки

Запропоновано підхід та математичну модель, що передбачає виявлення місця потенційного пошкодження ізоляції працюючого турбогенератора з використання технологій інфрачервоної техніки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Klempner G. Handbook of large turbo-generator operation and maintenance / G.Klempner, I. Kerszenbaum – Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2018. – 1035 p.
2. Пат. 157980 Україна, МПК G 01 K 13 / 00. Пристрій для безконтактного вимірювання температури / Грабко В.В., Грабко В.В., Ощепков В.С., Поліщук В.Л.; Заявник та патентотримувач Вінницький національний університет. – № u202402539; Заявл. 13.05.2024; Опубл. 18.12.2024; Бюл. №51. – 10 с.

Габко Валентин Володимирович – к.т.н., доцент, доцент кафедри комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, grabko@vntu.edu.ua

Ощепков Віктор Сергійович – аспірант кафедри комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів, факультет електроенергетики та електромеханіки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, grabko@vntu.edu.ua

Grabko Valentyn V. – PhD, Docent, Docent with the Department of Computerized Electromechanical Systems and Complexes, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, grabko@vntu.edu.ua

Oshchepkov Viktor S. – PhD student at the Department of Computerized Electromechanical Systems and Complexes, Faculty of Electrical Power Engineering and Electromechanics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, grabko@vntu.edu.ua

ПРО ОДИН СПОСІБ РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ СИЛОВИМ ТРАНСФОРМАТОРОМ З ПРИСТРОЄМ РЕГУЛЮВАННЯ ПІД НАВАНТАЖЕННЯМ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Для регулювання напруги споживачів в роботі запропоновано поєднати роботу силового трансформатора з пристроєм РПН з трансформаторами нижчого класу напруги, в яких враховувати номери відгалуження у пристроях перемикачів без збудження. Для цього контролюється значення напруги на віддалених споживачах електроенергії і на підставі аналізу сигналів з використанням нейронної мережі для оперативного персоналу формується пропозиція щодо бажаного положення відгалуження у пристрої перемикачів без збудження на певний тривалий період.

Ключові слова: силовий трансформатор, пристрій регулювання під навантаженням, регулювання без збудження, закон регулювання напруги, нейронна модель.

Abstract

To regulate the voltage of consumers in operation, it is proposed to combine the operation of a power transformer with a tap-changer device with transformers of a lower voltage class, in which the tap numbers in the switching devices without excitation should be taken into account. To do this, the voltage value at remote electricity consumers is monitored and, based on signal analysis using a neural network, a proposal is formed for operational personnel regarding the desired branch position in the switching device without excitation for a certain long period.

Keywords: power transformer, on-load regulation device, off-excitation regulation, voltage regulation law, neural model.

Як відомо, в розподільних електричних мережах для регулювання напруги використовуються силові трансформатори з пристроями регулювання під навантаженням (РПН) [1]. Окрім зазначених, в електричних мережах 6 – 10 кВ сезонна зміна коефіцієнта трансформації відбувається за рахунок пристроїв перемикачів без збудження.

Відомо, що силовий трансформатор з пристроєм РПН споряджається автоматичним регулятором, в який закладається закон регулювання напруги, різноманіття яких є досить широким.

У разі прогнозованого навантаження оперативний персонал налаштовує зазначені пристрої таким чином, що споживачі отримують електроенергію з напругою відповідно до допустимих норм.

Якщо ж навантаження не є детермінованим, то в багатьох випадках спрогнозувати нормальну роботу споживачів електроенергії складніше. Це обумовлено наступним. Очевидно, що силовий трансформатор з пристроєм РПН переважно по закону зустрічного регулювання забезпечує на шинах низької напруги підтримання напруги на номінальному рівні, однак на віддалених споживачах, в залежності від фактичного навантаження, напруга може суттєво відрізнитись від допустимих значень.

В даній роботі пропонується підхід, яким передбачається моніторинг напруги на віддалених споживачах електроенергії і в залежності від значень відхилення напруги від допустимого значення та номеру відгалуження на силовому трансформаторі з РПН для оперативного персоналу формується сигнал щодо перемикачів відгалуження на пристрої перемикачів без навантаження на пропонуване положення.

Очевидно, що часто зміну положення пристрою перемикачів без навантаження міняти не є логічним. А тому в роботі пропонується використання нейронної мережі, за допомогою якої апроксимується процес зміни навантаження споживачів та формуються сигнали для перемикачів відгалужень з прийнятною періодичністю.

Висновки

Запропоновано підхід, який дозволяє налаштувати електропостачання споживачів найоптимальнішим чином з використанням нейронної мережі шляхом впливу на процес регулювання напруги трансформаторами з пристроями РПН та пристроями регулювання без збудження.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Лежнюк, П. Д. Регулювання напруги в електричних системах. Навчальний посібник / П. Д. Лежнюк, В. О. Комар. — 2-е вид. — Вінниця: УНІВЕРСУМВінниця, 2010. — 171 с.

Габко Валентин Володимирович – к.т.н., доцент, доцент кафедри комп’ютеризованих електромеханічних систем і комплексів, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, grabko@vntu.edu.ua

Козаченко Богдан Віталійович – аспірант кафедри комп’ютеризованих електромеханічних систем і комплексів, факультет електроенергетики та електромеханіки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, grabko@vntu.edu.ua

Grabko Valentyn V. – PhD, Docent, Docent with the Department of Computerized Electromechanical Systems and Complexes, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, grabko@vntu.edu.ua

Kozachenko Bohdan V. – PhD student at the Department of Computerized Electromechanical Systems and Complexes, Faculty of Electrical Power Engineering and Electromechanics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, grabko@vntu.edu.ua

ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ТРЕКЕРІВ З ФОТОЕЛЕКТРИЧНИМИ ПАНЕЛЯМИ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі наведено результати досліджень впливу освітленості, температури та кута обдування фотоелектричної панелі (ФЕП) зовнішнім повітрям (наприклад, вітром) на фотострум ФЕП, закріпленої на робочому столі трекера (РСТ). Описано лабораторну модель трекера (ЛМТ), з якою проведені експерименти з обдуванням холодним і гарячим повітрям. Було показано, що оптимальне положення ФЕП відносно сонця та потоку вітру, який обдуває панель на робочому столі трекера дозволяють підвищити ефективність генерування ФЕП фотоструму.

Ключові слова: ФЕП, фотострум, освітленість, температура, обдування, ефективність.

Abstract

The paper presents the results of studies of the influence of illumination, temperature, and the angle of blowing of a photovoltaic panel (PVP) by external air (for example, wind) on the photocurrent of a PVP mounted on a tracker desktop TDP). A laboratory model of the tracker (LMT) is described, with which experiments with blowing cold and hot air were conducted. It was shown that the optimal position of the PEP relative to the sun and the wind flow blowing the panel on the tracker desktop allow to increase the efficiency of PEP photocurrent generation.

Keywords: PVP, photocurrent, illumination, temperature, blowing, efficiency.

Вступ

У сучасних умовах розвитку енергетики все більшу роль у виробництві електроенергії відіграють відновлювані джерела енергії. Одним із найперспективніших напрямів є використання енергії Сонця [1]. Фотоелектричний трекер (ФЕТ) дозволяє отримати максимальну кількість сонячної радіації за його місце розташування шляхом повороту ФЕТ відносно Сонця і вітру.

Однак ефективність роботи ФЕТ залежить від багатьох факторів: освітленості [2], температури, типу матеріалу ФЕП, його конструкційні особливості та стабільністю сонячного випромінювання.

Метою даного дослідження є аналіз способів підвищення фотоструму фотоелектричного трекера (ФЕТ) у процесі його експлуатації.

Основна частина

Зазвичай ФЕП використовують без сонячного трекера (СТ) розташовуючи ФЕП на дахах, зовнішніх стінах або на підвір'ї. Розташування сонця змінюється протягом часу і пори року. Зафіксована панель з ранку до вечора генерує 10-15% від номінального можливого генерування фотоструму. В той час як використання СТ збільшує ККД ФЕП шляхом зміни кута положення поверхні ФЕП відносно світлового потоку. Принцип роботи ФЕТ полягає в тому, що контролер, отримуючи дані від кількох датчиків, визначає оптимальне положення поверхні ФЕП відносно напрямку сонячного випромінювання та здійснює його поворот у потрібний бік. Завдяки цьому ефективність роботи сонячних панелей може підвищуватися до 40-50% від номінальної [3].

Це є особливо важливим для сонячної електричної станції (СЕС), де використовується велика кількість ФЕП для генерації електричної енергії.

Як приклад, на одній сонячній електростанції використовується понад 100 ФЕТ, що дозволяє отримати максимальну кількість електроенергії за місцем розташування фотоелектричної станції (ФЕС) (рисунк 1).



Рисунок 1 – Сонячні трекери на одній з ФЕС

Дослідження показали, що в процесі експлуатації ФЕТ на генерацію фотоелектричного струму впливає не лише освітленість поверхні ФЕП, а й її температура.

За результатами досліджень авторами побудований графіки, який показаний на рисунку 2. На рис.2 показано, що зі збільшенням температури на поверхні ФЕП ефективність генерації фотоелектричного струму зменшується.

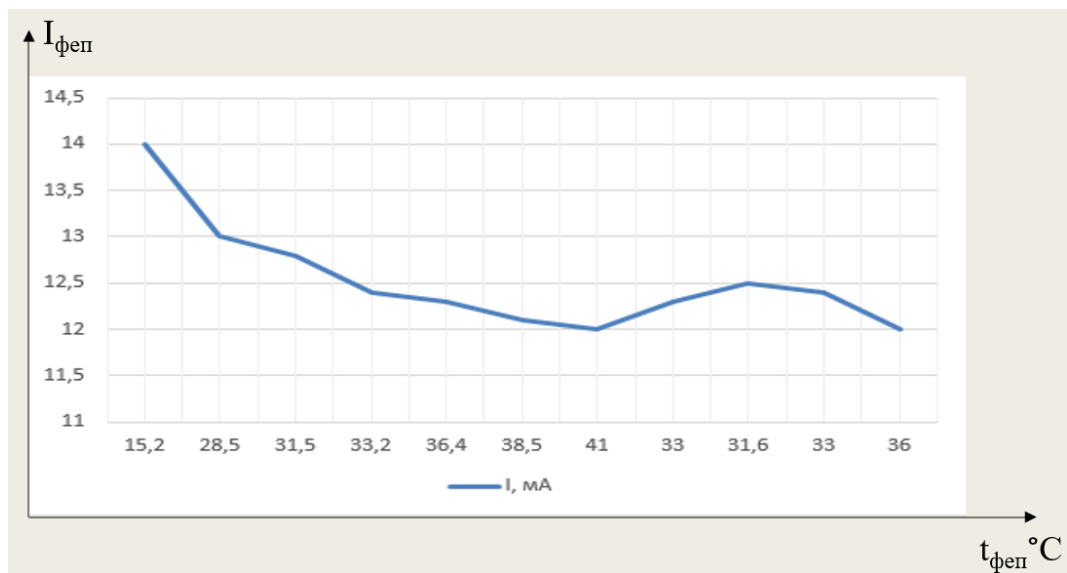


Рисунок 2 – Залежність генерованого ФЕП фотоелектричного струму від температури поверхні ФЕП

Було проведено дослідження з використанням лабораторної моделі ФЕП, яка показана на рисунку 3. Під час експерименту поверхню модуля обдували холодним і гарячим повітрям. При цьому змінювали кут обдування холодним потоком, а кут обдування гарячим повітрям залишався сталим.



Рисунок 3 – Лабораторної моделі ФЕП

Експеримент показав, що кут обдування холодним повітрям дійсно впливає на генерацію фотоелектричного струму ФЕП (рисунок 4).

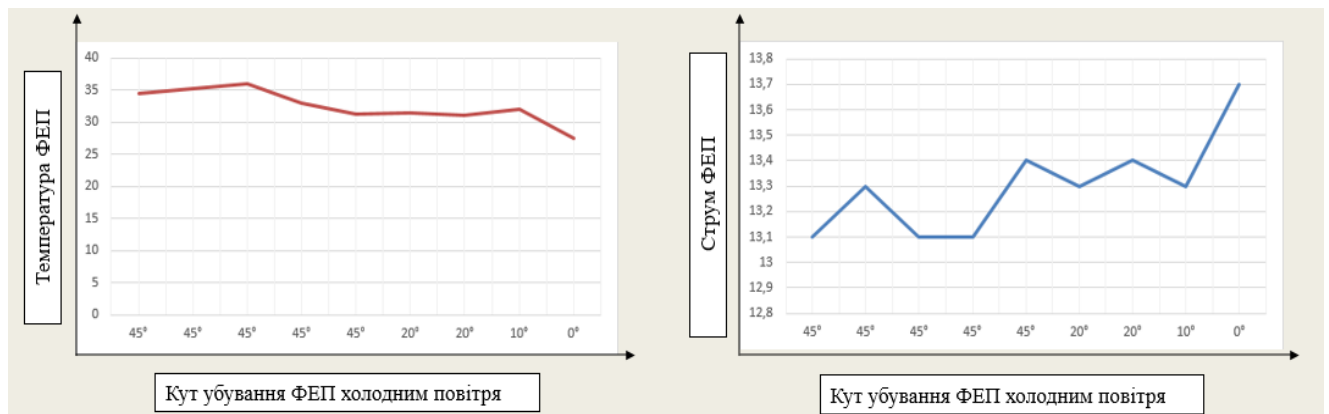


Рисунок 4 – Генерація ФЕП від кута обдування холодним повітрям

Використаємо одно факторний дисперсійний аналіз для перевірки гіпотези про зростання фотоелектричного струму ФЕП підчас зменшення кута між напрямком холодного повітря та поверхнею ФЕП [4].

Досліджувати вплив факторів за їхніми дисперсіями зручно, оскільки це є простою мірою розсіювання, яка, до того ж, відповідає мірі впливу випадкових причин – тобто дисперсії одиничного спостереження (відтворення) σ^2 . Це дає змогу порівнювати дію будь-якого досліджуваного фактора з випадковим. Такий підхід до вивчення факторів за їхніми дисперсіями називають дисперсійним аналізом. Цей метод був запропонований Р. А. Фішером і пізніше розвинений Йейтсом. Розглянемо основну ідею дисперсійного аналізу на прикладі дослідження впливу одного фактора в умовах наявності випадкових похибок, коли дисперсія відтворення σ^2 відома.

Результати розрахунків представлені на рисунках 5 і 6.

Обчислимо загальне середнє значення:

$$I_{\text{срФЕП}} = \frac{13,1+13,3+13,1+13,1+13,4+13,3+13,4+13,3+13,7}{9} = 13,3 \quad (\text{мА})$$

Обчислимо середнє значення для кожної групи:

Для кута 45°:

$$I_{\text{ФЕП}45^\circ} = \frac{13,1+13,3+13,1+13,1+13,4}{5} = 13,2 \quad (\text{мА})$$

Для кута 20°:

$$I_{\text{ФЕП}20^\circ} = \frac{13,3+13,4}{2} = 13,35 \quad (\text{мА})$$

Для кута 10°:

$$I_{\text{ФЕП}10^\circ} = 13,3 \quad (\text{мА})$$

Для кута 0°:

$$I_{\text{ФЕП}0^\circ} = 13,7 \quad (\text{мА})$$

Обчислимо суму квадратів між групами (SSB) за формулою:

$$SSB = \sum ni(x_i - \bar{x})^2$$

$$SSB = 5 \cdot (13,2 - 13,3)^2 + 2 \cdot (13,35 - 13,3)^2 + 1 \cdot (13,3 - 13,3)^2 + 1 \cdot (13,7 - 13,3)^2 = 0,215 \quad (\text{мА})$$

де n_i – обсяг вибірки i -ї групи, x_i – середнє значення в i -ї групі, а $\bar{x}$ – загальнє значення.

Рисунок 5 – Розрахунок одно факторного дисперсійного аналізу

Обчислимо суму квадратів всередині груп (SSW) за формулою:

$$SSW = \sum \sum ni(x_i - \bar{x})^2$$

Для кута 45°:

$$I'_{\text{ФЕП}45^\circ} = (13,1 - 13,2)^2 + (13,3 - 13,2)^2 + (13,1 - 13,2)^2 + (13,1 - 13,2)^2 + (13,4 - 13,2)^2 = 0,08 \quad (\text{мА})$$

Для кута 20°:

$$I'_{\text{ФЕП}20^\circ} = (13,3 - 13,35)^2 + (13,4 - 13,35)^2 = 0,005 \quad (\text{мА})$$

Для кута 10°:

$$I_{\text{ФЕП}10^\circ} = (13,3 - 13,3)^2 = 0 \quad (\text{мА})$$

Для кута 0°:

$$I_{\text{ФЕП}0^\circ} = (13,7 - 13,7)^2 = 0 \quad (\text{мА})$$

$$SSW = 0,08 + 0,005 + 0 + 0 = 0,085 \quad (\text{мА})$$

де x_i – i -те спостереження в j -тій групі, $\bar{x}$ – середнє значення в j -тій групі, а j – від 1 до k груп.

Обчислимо F – статистику, поділивши між групу дисперсію (SSB) на внутрішню групу дисперсію (SSW):

$$F = \frac{\left[\frac{SSB}{(k-1)} \right]}{\left[\frac{SSW}{(n-k)} \right]} = \frac{\left[\frac{0,215}{(4-1)} \right]}{\left[\frac{0,085}{(9-4)} \right]} = 4,216$$

Тепер потрібно визначити $F_{\text{кр}}$ для цього визначимо наступні значення:

$$r_1 = (4-1) = 3$$

$$r_2 = (9-4) = 5$$

Приймаємо $\alpha = 0,975$. Тепер використовуємо таблицю [6] і визначаємо $F_{\text{кр}} = 5,41$. Оскільки $F > F_{\text{кр}}$, тобто $4,216 > 0,067$, ми відхиляємо нульову гіпотезу. Нульова гіпотеза – це припущення, що між досліджуваними явищами або вибірками немає суттєвої різниці чи впливу. Вона служить вихідною точкою для статистичного аналізу. Якщо ми відхиляємо нульову гіпотезу, це означає, що між вибірками або факторами є статистично значуща різниця.

Рисунок 6 – Продовження одно факторного дисперсійного аналізу

Висновки

1. Дослідження показали, що ФЕТ значно підвищує ефективність панелей – до 40-50% порівняно з використанням фіксованого положення ФЕП 10-15%.
2. На генерацію фотоструму впливають освітленість, температура та кут обдування панелі холодним повітрям. Експерименти підтвердили, що правильне орієнтування ФЕП і регулювання її температури шляхом обдування під різними кутами дають змогу отримати максимальну кількість електроенергії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Mehmet K., Yunus A. Ç., John M. C., Fundamentals and Applications of Renewable Energy, 2024 – 398 с.
2. Освітленість. – Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0_%9E%D1%81%D0%B2%D1%96%D1%82%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D1%96%D1%81%D1%82%D1%8C

3. Фотоелектричний трекер. – Режим доступу: <https://www.solargarden.com.ua/trekery-dlya-sonyachnyh-panelej-konstruktsiya-pryntsyp-roboty-efektyvnist/>
4. Одно факторний дисперсійний аналіз. – Режим доступу: <https://mindthegraph.com/blog/uk/%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D1%8F-%D0%B0%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%B0/>
5. Лежнюк П.Д., Рубаненко О.Є., Лук'яненко Ю. В. Основи теорії планування експерименту. Лабораторний практикум. - Вінниця: ВНТУ, 2006. - 168 с.
6. Таблиця критичних значень. – Режим доступу: <https://blog.etrabez.pl/wp-content/uploads/sites/3/2022/05/TABLICE-rozklad-Fishera-Snedecora-%D0%A4%D1%96%D1%88%D0%B5%D1%80-%D0%A1%D0%BD%D0%B5%D0%B4%D0%B5%D0%BA%D0%BE%D1%80-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%BE%D0%B4%D1%96%D0%BB%D1%8C%D1%87%D1%96-%D0%A2%D0%90%D0%91%D0%9B%D0%98%D0%A6%D0%86.pdf>

Химич Владислав Вадимович – студент групи ЕС-25м, факультет електроенергетики, електромеханіки та електротехніки. Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: vlad90123456@gmail.com

Рубаненко Олександр Євгенійович – канд. техн. наук, професор кафедри електричних станцій та систем. Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: rubanenko.o.y@vntu.edu.ua

Vladyslav V. Hhymych – student group ES-25m, Faculty of Electrical Engineering, Electromechanics and Electrical Engineering. Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: vlad90123456@gmail.com

Oleksandr Y. Rubanenko - Ph.D. in Technical Sciences, Professor of the Department of Electric Power Stations and Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: rubanenko.o.y@vntu.edu.ua

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ЗБОРУ ДАНИХ ГЕНЕРАЦІЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ

¹ Вінницький національний технічний університет;

Анотація

Запропоновано підхід до побудови інформаційно-вимірювальної системи для визначення характеристик генерування електроенергії сонячними панелями.

Ключові слова: сонячна панель, Google Sheet, контролер, сенсор, вимірювання.

Abstract

An approach to the construction of an information and measurement system for determining the characteristics of electricity generation by solar panels is proposed.

Keywords: solar panel, Google Sheet, controller, sensor, measurement.

Вступ

При проектуванні фотоелектричних систем актуальною є задача розрахунку та вибору необхідної кількості сонячних панелей та параметрів їх оптимальної інсталяції [1].

Величина вихідної потужності сонячних панелей залежить від багатьох факторів: величина сонячної радіації, температура повітря, матеріал та технологія виготовлення фотоелектричних елементів, алгоритм управління потужністю генерації з врахування вольт-амперної характеристики панелі [2]. Є велика кількість математичних моделей, які описують оптимальні параметри інсталяції та використання енергії сонячних панелей. Ці моделі потребують перевірки та адаптації до умов конкретного регіону, що неможливо без виконання ряду експериментальних досліджень. Пристрої вимірювання параметрів генерації сонячними панелями [3, 4] мають стаціонарне виконання, що унеможливорює їх використання в польових умовах для аналізу параметрів генерації на вже встановлених панелях.

Тому актуальною є задача розробки інформаційно-вимірювальних систем для визначення характеристик сонячних панелей за фактичних умов їх інсталяції.

Метою роботи є синтез апаратного та програмного забезпечення для побудови інформаційно-вимірювальної системи для визначення параметрів генерації сонячної панелі в конкретному місці її інсталяції. Дана задача висуває до системи ряд вимог: можливість автономної роботи, формування віддаленої бази даних результатів вимірювання, можливість формування необхідної вибірки даних та їх обробки.

Результати дослідження

Для розв'язання задачі запропоновано пристрій структурна схема якого зображена на рис. 1. Сонячні панелі SP підключені через контролер UI до навантаження Z_L та акумуляторної батареї G. Для визначення струмів та напруг панелі, навантаження та акумулятора використано цифрові сенсори pAV1-3. Вихідні сигнали сенсорів пропорційні струму та напрузі поступають до мікроконтролера MCU. Для синхронізації по часу мікроконтролер використовує інформацію модуля реального часу RTC, також передбачено запис інформації вимірювання на зовнішню карту пам'яті SD. Технічні характеристики пристрою наведені в табл. 1.

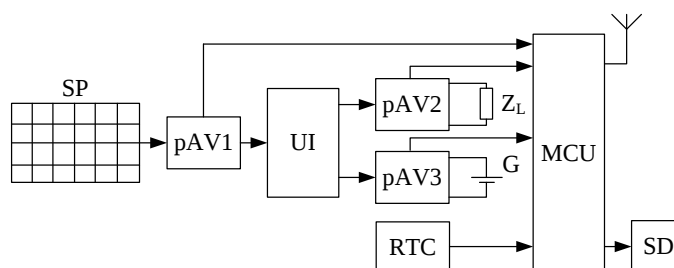


Рис. 1 – Структурна схема пристрою для визначення характеристик сонячних панелей

Табл. 1 – Технічні характеристики

Параметр	Значення
Кількість каналів моніторингу	3
Діапазон вимірюваних напруг, В	0...26
Діапазон вимірюваних струмів, А	-3,6...3,6
Швидкість передачі даних, б/с	115200
Метод формул. вимірювань значень	Усереднення 1000 значень з вибірки 128 точок
Час вибірки на канал, мс	68,1
Дискретність вимірювання, с	10
Живлення пристрою,	5В через USB, або від зовн. джерела ($V_{in} = 6...12В$).
Підключення до ПК	USB --- RS-232
Пам'ять карти Gb	4

Виміряні усереднені дані струмів і напруг та розраховані потужності панелі, навантаження та акумуляторної батареї записуються через рівні проміжки часу на карту пам'яті, паралельно, через Wi-Fi модуль ці дані передаються у вигляді GET запиту. В якості серера використовується Google Sheet таблиця, яка розгорнута в режимі веб-додатку за допомогою інструменту Apps Script. Відповідний js-скрипт здійснює обробку http запитів, які формує мікроконтролер, записуючи GET параметри у відповідні комірки таблиці, також передбачено запис поточного часу формування запиту. Фрагмент таблиці наведено на рис. 2, дані вимірювань заповнюють її в реальному часі.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	Date	Time	Напруга_1 (В)	Струм_1 (мА)	Потужність_1 (мВт)	Напруга_2 (В)	Струм_2 (мА)	Потужність_2 (мВт)	Напруга_3 (В)	Струм_3 (мА)	Потужність_3 (мВт)
2	28/08/2022	7:49:38	1.00	0.04	0	1	0	0	0.99	0.02	0
3	28/08/2022	7:49:45	1.00	0.03	0	1	0	0	0.99	0.02	0
4	28/08/2022	7:49:53	1.00	0.03	0	1	0	0	0.99	0.02	0

Рис. 2 – Фрагмент таблиці з вимірювальними значеннями

Для візуального відображення поточних результатів вимірювання на іншій вкладці створено графічний інтерфейс користувача засобами Google Sheet (рис. 3).



Рис. 3 – Графічний інтерфейс користувача інформаційно-вимірювальної системи

Використовуючи функції Google Sheet на інших вкладках документа можна формувати необхідні вибірки та здійснювати обробку інформації про енергетичні процеси в системі.

Висновки

В роботі запропоновано підхід до побудови інформаційно-вимірювальних систем на основі використання можливостей Google Sheet з обробки GET запитів, що формують мікропроцесорні засоби вимірювання. Зокрема даний підхід успішно апробовано для визначення параметрів сонячних панелей у місцях їхньої інсталяції.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Колонтаєвський Ю. П. Фотоенергетика : навч. посібник / Ю. П. Колонтаєвський, Д. В. Тугай, С. В. Котелевець ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. – 160 с.
2. Rouholamini A. Optimal tilt angle determination of photovoltaic panel sand comparing of their mathematical model predictions to experimental data in Kerman /A. Rouholamini, H. Pourgharibshahi, R. Fadaeinedjad, G Moschopoulos // Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 2013 . 1-4.- 10.1109 / CCECE.2013. 6567674. [Електронний ресурс]. – Режим доступу:

<https://www.researchgate.net/publication/261283189> Optimal tilt angle determination of photovoltaic panels and comparing of their mathematical model predictions to experimental data in Kerman

3. Sani A. Measuring the commercial solar panel performance / A. Sani, E. Warman, A. Pranata, S. Suherman // IOP Conference Series Materials Science and Engineering, 2019.- 420. 10.1088/1757-899X/420/1/012051. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.researchgate.net/publication/327988772> Measuring the commercial solar panel performance

4. Kaldellis J. Temperature and wind speed impact on the efficiency of PV installations. Experience obtained from outdoor measurements in Greece / J. Kaldellis, M. Kapsali, K. Kavadias // Renewable Energy, 2014.- Vol 66.- P 612-624. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.researchgate.net/publication/266473887> Temperature and wind speed impact on the efficiency of PV installations Experience obtained from outdoor measurements in Greece

Дмитро Петрович Проценко — канд. техн. наук, доцент кафедри комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця.

Dmytro P. Protsenko — Cand. Sc. (Eng), Assistant Professor Department of Computerized Electromechanical Systems and Complexes, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.

МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ НЕСИНУСОЇДНОЇ НАПРУГИ ЖИВЛЕННЯ НА РЕЖИМИ РОБОТИ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу.

Анотація

Розроблено підмодель генератора несинусоїдної напруги для Bond Graph моделі асинхронного електроприводу та проведено дослідження впливу періодичної несинусоїдної напруги живлення на його режими роботи. Запропонована Bond Graph асинхронного електроприводу дає змогу здійснювати прогноз як миттєвих значень струмів в ній, так і амплітуд та початкових фаз гармонійних складових у разі невідповідності електроенергії встановленим показникам її якості.

Ключові слова: Bond Graph, генератор несинусоїдної напруги, асинхронний електропривід, режими роботи.

Abstract

A submodel of a nonsinusoidal voltage generator was developed for the Bond Graph model of an asynchronous electric drive, and a study was carried out on the influence of periodic nonsinusoidal supply voltage on its operating modes. The proposed Bond Graph model of the asynchronous drive enables prediction of instantaneous current values as well as the amplitudes and initial phases of harmonic components in the event that the power supply does not meet established quality standards.

Keywords: Bond Graph; nonsinusoidal voltage generator; induction electric drive; operating modes.

Вступ

У сучасних умовах якість електроенергії в електромережах зазнає суттєвого погіршення. Зростання кількості нелінійних навантажень, таких як перетворювачі частоти, джерела безперебійного живлення, сучасні електронні пристрої та системи, призводить до появи гармонійних викривлень, перепадів напруги, провалів та інших аномалій. Несинусоїдність напруги живлення істотно впливає на роботу асинхронних електроприводів, оскільки призводить до спотворення електромагнітних процесів у двигуні. За умови наявності вищих гармонік напруги живлення в обмотках статора електродвигуна з'являються гармонічні складові струмів, які не беруть участі у створенні корисного обертового моменту, але підвищують діючі значення струму, спричиняючи додаткові втрати енергії у міді та сталі. Це призводить до підвищення температури обмоток і активних частин двигуна, що зменшує його енергоефективність та скорочує термін служби [1].

Метою роботи є розроблення підмоделі генератора несинусоїдної напруги для Bond Graph моделі асинхронного електроприводу з подальшим дослідженням впливу несинусоїдної напруги живлення на його режими роботи.

Результати дослідження

Для моделювання впливу несинусоїдної напруги на режими роботи асинхронного електроприводу застосовано метод Bond Graph [2], що є доцільним завдяки його універсальності та фізичній обґрунтованості. Цей метод базується на принципах енергетичної взаємодії між підсистемами різної фізичної природи та дозволяє описувати електричні, магнітні й механічні процеси у єдиному енергетичному просторі. Використання методу Bond Graph забезпечує зручність побудови узагальненої структури моделі асинхронного електроприводу, автоматичне формування рівнянь стану та можливість урахування нелінійностей і перехідних процесів, що виникають під впливом вищих гармонік напруги живлення. Такий підхід дає змогу отримати достовірну оцінку енергетичних показників та динамічних характеристик електроприводу в умовах відхилення показників якості електроенергії від нормативних значень.

Дослідження впливу періодичної несинусоїдальної напруги живлення на режими роботи асинхронних електроприводів значно спрощується, якщо криву напруги представити у вигляді ряду Фур'є:

$$u(t) = A_0 + A_{m1} \sin(\omega t + \varphi_1) + A_{m2} \sin(2\omega t + \varphi_2) + \dots = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_{mk} \sin(k\omega t + \varphi_k) , \quad (1)$$

де A_0 – стала складова (нульова гармоніка); $A_{m1} \sin(\omega t + \varphi_1)$ – основна або перша гармоніка; $A_{mk} \sin(k\omega t + \varphi_k)$ – вища гармоніка k -го порядку; $\omega = \frac{1}{T}$ – основна частота (кутова); T – період несинусоїдної функції.

Від форми ряду (1) легко перейти до іншої форми (2), врахувавши значення синуса суми $(k\omega t + \varphi_k)$:

$$\begin{aligned} u(t) &= A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_{mk} \cdot \cos \varphi_k \cdot \sin(k\omega t + \varphi_k) + \sum_{k=1}^{\infty} A_{mk} \cdot \sin \varphi_k \cdot \cos(k\omega t + \varphi_k) = \\ &= A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} B_k \cdot \sin(k\omega t) + \sum_{k=1}^{\infty} C_k \cdot \cos(k\omega t) \end{aligned} \quad (2)$$

де $B_k = A_{mk} \cdot \cos \varphi_k$; $C_k = A_{mk} \cdot \sin \varphi_k$.

Періодичні несинусоїдальні криві, які мають певні види симетрії, значно спрощують процес розкладання у ряд Фур'є, оскільки деякі гармоніки автоматично виключаються. Якщо припустити, що несинусоїдна крива напруги живлення симетрична відносно осі абсцис, то під час розкладання таких кривих рядом Фур'є нульова і парні гармоніки стають рівними нулю, а сам ряд має вигляд:

$$u(t) = B_1 \cdot \sin(\omega t) + C_1 \cdot \cos(\omega t) + B_3 \cdot \sin(3\omega t) + C_3 \cdot \cos(3\omega t) + B_5 \cdot \sin(5\omega t) + C_5 \cdot \cos(5\omega t) , \quad (3)$$

Рівняння (3) покладено в основу розроблення підмоделі генератора несинусоїдної напруги (рис.1.) методом Bond Graph. Дана підмодель складається із семи розрахункових блоків та трьох елементів. Перші три розрахункові блоки 1–harmonic ; 3–harmonic ; 5–harmonic , задають відповідно першу, третю та п'яту гармонічну складову несинусоїдної напруги. За необхідності кількість гармонічних складових можна збільшити. Далі на розрахунковому блоці Sum відбувається сумування згенерованих гармонічних складових у вигляді функції (3), яка відповідно подається на клемі трифазного джерела напруги. Далі проводимо моделювання впливу періодичної несинусоїдальної напруги живлення на режими роботи електроприводів за допомогою розробленої Bond Graph асинхронного двигуна [3].

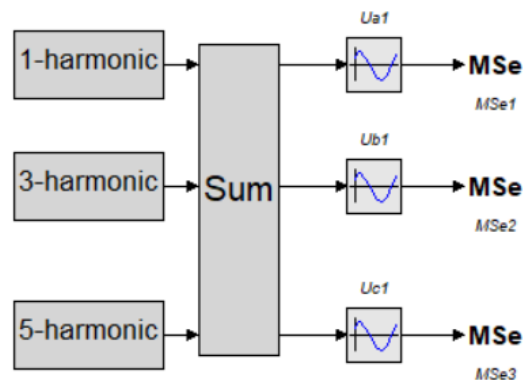


Рис.1 – Підмодель генератора несинусоїдної напруги.

Задавши форму несинусоїдної напруги живлення на затискачах високовольтного електроприводу ВАО2-400LB-2У2 асинхронного електроприводу отримуємо гармонічні складові струмів, яких в усталеному режимі роботи зображені на рис.2.

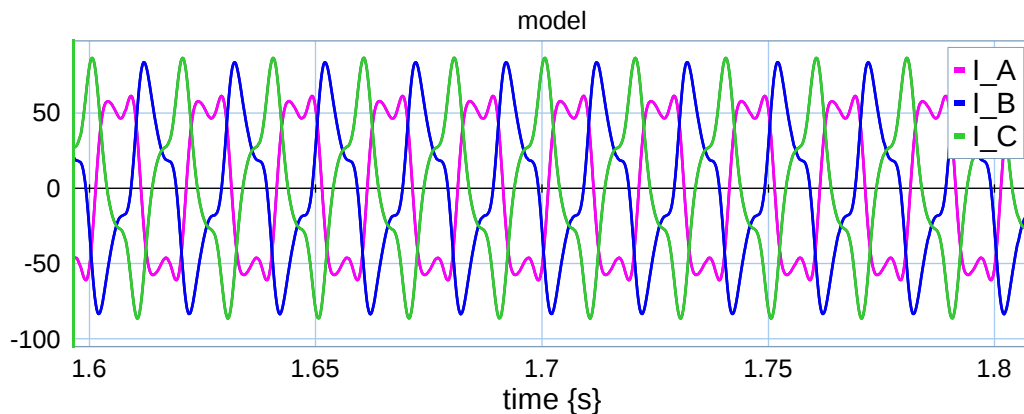


Рис.2 – Гармонічні складові струмів статора високовольтного електродвигуна ВАО2-400LB-2У2 в усталеному режимі роботи за умови живлення несинусоїдною напругою.

Висновки

Моделювання впливу несинусоїдної напруги на режими роботи асинхронних електроприводів дозволяє розробити рекомендації щодо зменшення негативних наслідків. Це сприятиме підвищенню надійності, зниженню експлуатаційних витрат та забезпеченню ефективного функціонування обладнання в умовах реальних мереж. Розроблена методом Bond Graph модель асинхронного електроприводу із підмоделлю генератора несинусоїдних напруг дозволяє здійснювати прогноз як миттєвих значень струмів в ній, так і амплітуд та початкових фаз гармонійних складових у разі невідповідності електроенергії встановленим показникам її якості.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Якість електроенергії та її вплив на електроспоживання і надійність роботи електроустаткування // PATRIOT-NRG. Міжнародний портал з енергозбереження [Веб-сайт]. - Київ. - URL: <https://patriot-nrg.com/content/yakist-elektroenergiyi-ta-yiyi-vplyv-na-elektrospozhyvannya-i-nadiynist-roboty>.
2. Karnopp, D., Rosenberg, R., Margolis, D., System Dynamics: Modeling, Simulation, and Control of Mechatronic Systems. – 5th ed. - Wiley, 2019. – 645с. ISBN: 978-0-470-88908-4.
3. Костишин В.С., Курляк П.О., Bond Graph модель асинхронного двигуна з врахуванням насичення магнітопроводу та ефекту витіснення струму в роторі // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – 2011. – №4 (30). – С.32-37.

Курляк Петро Омелянович — канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри електричної інженерії, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу.

Бацала Ярослав Васильович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електричної інженерії, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу.

Федорів Михайло Йосипович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електричної інженерії, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу.

Kurliak Petro O. — PhD (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Electrical Engineering, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, email: petro.kurliak@nunge.edu.ua.

Batsala Yaroslav V. — PhD (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas.

Fedoriv Mykhailo Y. — PhD (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas.

ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ СОНЯЧНОЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ

¹ Вінницький національний технічний університет;

Анотація

Розглянуто шляхи вдосконалення існуючих електромеханічних систем керування сонячними фотоелектричними станціями. Здійснено їх порівняльну характеристику. Запропоновано

Ключові слова: вакуумний вимикач, надійність, штучний інтелект.

Abstract

An approach to improving the reliability and safety of power systems through the implementation of intelligent diagnostic methods for vacuum circuit breakers is considered. The limitations of traditional condition monitoring methods are analyzed, and the feasibility of using artificial intelligence and machine learning technologies for automatic defect detection and equipment lifetime prediction is substantiated.

Keywords: vacuum circuit breaker, reliability, artificial intelligence.

Вступ

Сьогодні електрична енергія стала невід'ємною частиною життя людей, яка надає розвиток і комфортне проживання. Виробництво енергії з традиційних джерел, є екологічно шкідливими, і це виробництво з кожним роком стає все більш затратним. Альтернативна енергетика – це будь-яке джерело електроенергії, яке є альтернативою для викопного палива. До альтернативних джерел енергії відносяться: сонячна, гідроелектрична, геотермальна та вітрова енергія. Використовування цих видів енергії допомагають зменшити шкідливі викиди в навколишнє середовище, та зменшує залежність від палива під час генерації енергії. Розвиток сонячної енергетики є важливим напрямком розвитку України. Не тільки через виснаження традиційних енергетичних ресурсів, збільшення навантаження на навколишнє середовище, алей через подорожання електроенергії та не стабільну роботу мережі яка впливає на продуктивність, тому в наш час багато підприємств прагнуть генерувати свою потужність для заощадження та автономії під час зникнення основної мережі живлення. Сучасні енергетичні тенденції орієнтуються на впровадження відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), що дозволяє підвищити енергоефективність та зменшити вуглецевий слід підприємств. ТОВ «Вінницька птахофабрика» [1] є прикладом інтеграції фотоелектричних систем (ФЕС) у структуру промислового енергоспоживання.

Результати дослідження

Електромеханічна система керування [2] сонячної фотоелектричної станції (рисунк 1) базується на принципах автоматизованого позиціонування фотоелектричних модулів (ФЕМ) під кутом відносно положення сонця в азимуті для відбору максимальної потужності.



Рисунок 1 – Електромеханічна система керування фотоелектричною сонячною станцією

Основні компоненти:

1. Сенсори для моніторингу положення сонця.

2. Електродвигуни (крокові або сервоприводи) для механічного повороту панелей (азимутальний та висотний трекінг).

3. Мікроконтролери (на базі Arduino або PLC) з алгоритмами MPPT (Maximum Power Point Tracking) для синхронізації з інверторами.

4. Відповідна математична модель для пошуку найвигіднішого положення панелей для відбору максимальної потужності сонячними панелями. У системах для дахових СЕС (як на птахофабриці) використовується гібридний трекінг з фіксованими елементами для мінімізації механічних навантажень.

Уже встановлені фотоелектричні станції на підприємстві уже дозволили за 2024–2025 рр. система забезпечила 25% покриття енергопотреб птахофабрики, зекономивши 1,2 млн грн на електроенергії. Тому удосконалення такої СЕС з використанням електромеханічної системи керування дозволить збільшити економію та покращити використання енергії сонця для власних потреб.

В межах ТОВ «Вінницька птахофабрика», де вже впроваджено дахову СЕС, подальше розширення та вдосконалення може включати інтеграцію штучного інтелекту (AI) для прогнозного керування. Це дозволить переходити від реактивного (на основі поточних даних) до проактивного керування, де система передбачає зміни генерації на основі погодних умов. Реалізація базується на машинному навчанні (ML) [3] для аналізу метеоданих, що інтегрується з існуючою електромеханічною системою (трекерами, інверторами та SCADA).

Можливі способи реалізації

1. Збір та обробка даних: інтеграція сенсорів IoT (температура, вологість, хмарність) з зовнішніми API погоди (наприклад, OpenWeatherMap або ECMWF). Дані агрегуються в реальному часі для навчання ML-моделей. У системі птахофабрики це можна реалізувати через розширення PLC, додавши модулі для edge computing (наприклад, на базі Raspberry Pi з TensorFlow Lite).

2. ML-моделі для прогнозу: використання алгоритмів, таких як LSTM (Long Short-Term Memory) для часових рядів або Random Forest для класифікації погодних патернів. Модель навчається на історичних даних генерації СЕС та метеоданих: прогнозує сонячну іррадіацію з точністю до 95% на 24–48 годин вперед. Приклад: модель аналізує хмарність для коригування кута нахилу панелей заздалегідь, оптимізуючи MPPT.

3. Інтеграція з керуванням: AI-алгоритми інтегруються в SCADA через OPC UA-протокол, де прогнозні дані автоматично коригують сервоприводи трекерів (збільшення кута на 5–10° при наближенні хмар).

Висновки

Отже, така інтеграція перетворить СЕС птахофабрики на "розумну" систему, готову до викликів 2025–2030 рр., з потенціалом для грантів від ЄС на зелені технології.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. ТОВ Вінницька птахофабрика – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://latifundist.com/kompanii/1416-vinnitskaya-ptitsefabrika>

2. Система керування [Електронний ресурс] Режим доступу: <https://isolar.km.ua/>

3. Laouafi, F., Improved grey wolf optimizer for optimal reactive power dispatch with integration of wind and solar energy. Electrical Engineering & Electromechanics, KhPI. - 2025

Коритний Андрій Віталійович – студент групи ЕПА-24м Вінницького національного технічного університету, Вінниця, korutnuyandriy2@gmail.com

Бомбик Вадим Сергійович – к.т.н., старший викладач кафедри комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, vsbombyk@gmail.com

Korytnyy Andriy V. – student of group EPA-24m of Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, korutnuyandriy2@gmail.com

Bombyk Vadym Serhiyovych – PhD, senior lecturer at the Department of Computerized Electromechanical Systems and Complexes, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, vsbombyk@gmail.com

ПРО ТРИВІАЛЬНИЙ ХАРАКТЕР ІНВАРІАНТНОСТІ ПЕРЕДАТНОЇ ФУНКЦІЇ ВІДНОСНО ФУНКЦІЇ ВХІДНОЇ ДІЇ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

В роботі сформульовано та доведено теорему про тривіальний характер інваріантності передатної функції стаціонарного електричного кола відносно функції вхідної дії. Змістова сутність теореми визначає умови та накладає обмеження на застосування операторного методу при розв'язуванні фундаментальної задачі Коші.

Ключові слова: теоретична електротехніка, стаціонарне електричне коло, динамічна система, задача Коші, початкові умови, інтегральне перетворення Лапласа, передатна функція

Abstract

The paper formulates and proves a theorem on the trivial nature of the invariance of the transfer function of a stationary electric circuit with respect to the input action function. The semantic essence of the theorem determines the conditions and imposes restrictions on the application of the operator method in solving the fundamental Cauchy problem.

Keywords: theoretical electrical engineering, stationary electric circuit, dynamic system, Cauchy problem, initial conditions, Laplace integral transform, transfer function

Сформулюємо та доведемо теорему, сутність якої полягає в тому, що *передатна функція* електричного кола визначає його властивості *незалежно від вхідної дії* лише за нульових значень початкових умов. Хибна практика, що склалася у визначенні та застосуванні цього важливого параметра, на превеликий жаль, залишає поза увагою таку істотну властивість динамічної системи. Задачу розв'яжемо в узагальненому вигляді. Для цього розглянемо довільне лінійне електричне коло з одним джерелом електричної енергії, яке слугуватиме генератором збурення динамічної системи силовою дією $x(t)$, та реакцією системи на таку дію $y(t)$. За фізичним змістом функції $x(t)$ та $y(t)$ виявлятимуть себе як функції миттєвих напруг та (або) миттєвих струмів в електричному колі.

Теорема. *Інваріантність передатної функції лінійної стаціонарної (непараметричної) електричної системи до функції вхідної дії відносно початкових умов є тривіальною.*

Доведемо зазначене. Математичний зв'язок між дією та реакцією на неї в лінійній стаціонарній динамічній системі із зосередженими параметрами встановлюється математичним оператором, що належить до класу лінійних звичайних диференціальних рівнянь [1]:

$$\sum_{k=0}^n a_k \frac{d^k y}{dt^k} = \sum_{s=0}^m b_s \frac{d^s x}{dt^s}. \quad (1)$$

Скористаємося інтегральним перетворенням Лапласа і перейдемо до зображень: спочатку вхідної дії та реакції на неї, а потому – функцій лінійних комбінацій лівої та правої частин диференціального рівняння (1) з урахуванням лінійних властивостей системи. Отже,

$$X(p) = \int_0^{\infty} x(t) e^{-pt} dt = L\{x(t)\}, \quad Y(p) = \int_0^{\infty} y(t) e^{-pt} dt = L\{y(t)\}; \quad (2)$$

$$L\left\{\sum_{k=0}^n a_k \frac{d^k y}{dt^k}\right\} = L\left\{\sum_{s=0}^m b_s \frac{d^s x}{dt^s}\right\}; \quad \sum_{k=0}^n a_k L\left\{\frac{d^k y}{dt^k}\right\} = \sum_{s=0}^m b_s L\left\{\frac{d^s x}{dt^s}\right\}, \quad (3)$$

де, відповідно до теореми про диференціювання оригіналу, маємо:

$$L\left\{\frac{d^s x}{dt^s}\right\} = p^s X(p) - \sum_{\tau=0}^{s-1} p^{\tau} x^{(k-\tau-1)}(0_+); \quad L\left\{\frac{d^k y}{dt^k}\right\} = p^k Y(p) - \sum_{v=0}^{k-1} p^v y^{(k-v-1)}(0_+). \quad (4)$$

З урахуванням (1) – (4) математичний зв'язок поміж функціями $X(p)$ і $Y(p)$ набуває вигляду:

$$Y(p) \sum_{k=0}^n a_k p^k = X(p) \sum_{s=0}^m b_s p^s + \sum_{k=0}^n \sum_{v=0}^{k-1} a_k y^{(k-v-1)}(0_+) p^v - \sum_{s=0}^m \sum_{\tau=0}^{s-1} b_s x^{(k-\tau-1)}(0_+) p^{\tau},$$

звідки для *передатної функції динамічної системи* отримуємо

$$K_y(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{\sum_{s=0}^m b_s p^s}{\sum_{k=0}^n a_k p^k} + \frac{\sum_{k=0}^n \sum_{v=0}^{k-1} a_k y^{(k-v-1)}(0_+) p^v - \sum_{s=0}^m \sum_{\tau=0}^{s-1} b_s x^{(k-\tau-1)}(0_+) p^{\tau}}{\sum_{k=0}^n a_k p^k} \times \frac{1}{X(p)}.$$

Теорему доведено.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Б. І. Мокін, В. Б. Мокін, О. Б. Мокін, Математичні методи ідентифікації динамічних систем, Вінниця, Україна : ВНТУ, 2010, 263 с.

Ведміцький Юрій Григорович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри теоретичної електротехніки та електричних вимірювань, Вінницький національний технічний університет.

Vedmitsky Yuriy G. — PhD (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Theoretical Electrical Engineering and Electrical Measurements, Vinnytsia National Technical University., email: wjk@ukr.net.

СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ СИЛОВОГО ПРОЦЕСУ ЗА ДВОСТОРОННЬОЇ ШИРОТНО-ІМПУЛЬСНОЇ МОДУЛЯЦІЇ. УЗАГАЛЬНЕНИЙ АНАЛІТИЧНИЙ ПІДХІД

Вінницький національний технічний університет

Анотація

На основі проведеного спектрального аналізу силового процесу за наявної широтно-імпульсної модуляції отримано його спектральні характеристики в узагальненій та аналітичній формах.

Ключові слова: силова електроніка, силовий (енергетичний) процес, широтно-імпульсна модуляція, спектральний аналіз, тригонометричні ряди Фур'є, амплітудно- та фазово-частотні характеристики

Abstract

Based on the spectral analysis of the power process with available pulse-width modulation, its spectral characteristics were obtained in generalized and analytical forms.

Keywords: power electronics, power (energy) process, pulse-width modulation, spectral analysis, trigonometric Fourier series, amplitude and phase-frequency characteristics

В теоретичному базисі сучасної силової електроніки та перетворювальної техніки [1] з-поміж найважливіших функцій, які описують послідовність розгортання у часі силового (енергетичного) процесу із наперед визначеними характеристиками, є послідовність прямокутних імпульсів (рис. 1),

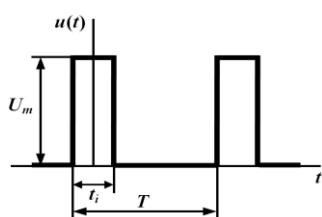


Рис. 1. Усталена послідовність ШІМ прямокутних імпульсів

тривалість t_i яких зазнає штучної зміни у часі за заданим законом (широтно-імпульсна модуляція). Однак потрібно зазначити, що водночас за такого перетворення окрім часових параметрів суттєвих змін зазнають і спектральні характеристики силового процесу. Зазначена обставина спонукає до побудови математичної моделі, яка б цей зв'язок в узагальненій і аналітичній формах виявляла. За поточного значення параметра t_i і до наступної його зміни в усталеному режимі роботи силових перетворювачів спостерігатиметься періодичність, і спектр силового процесу буде дискретним. Тому і розглядувана функція послідовності прямокутних імпульсів, що цей силовий процес математично описує, також матиме періодичний характер (див. рис. 1), і, як елемент лінійного простору 2π -періодичних функцій з ортогональним координатним базисом тригонометричних функцій, може бути розкладена в тригонометричний ряд Фур'є

$$u(t) = U^{(0)} + \sum_{k=1}^{\infty} A^{(k)} \cos k\omega t + B^{(k)} \sin k\omega t, \quad (1)$$

де за коефіцієнти Фур'є слугуватимуть функціонали:

$$A^{(k)} = \frac{2}{T} \int_{-\frac{t_i}{2}}^{-\frac{t_i}{2}+T} u(t) \cos k\omega t dt = \frac{2}{T} \int_{-\frac{t_i}{2}}^{+\frac{t_i}{2}} U_m \cos k\omega t dt = \frac{4}{k\omega T} U_m \sin \frac{k\omega t_i}{2} = 2 \frac{t_i}{T} U_m \frac{\sin \frac{k\omega t_i}{2}}{\frac{k\omega t_i}{2}}; \quad (2)$$

$$B^{(k)} = \frac{2}{T} \int_{-\frac{t_i}{2}}^{-\frac{t_i}{2}+T} u(t) \sin k\omega t dt = \frac{2}{T} \int_{-\frac{t_i}{2}}^{+\frac{t_i}{2}} U_m \sin k\omega t dt = 0; \quad U^{(0)} = \frac{1}{T} \int_{-\frac{t_i}{2}}^{-\frac{t_i}{2}+T} u(t) dt = \frac{1}{T} \int_{-\frac{t_i}{2}}^{+\frac{t_i}{2}} U_m dt = \frac{t_i}{T} U_m, \quad (3)$$

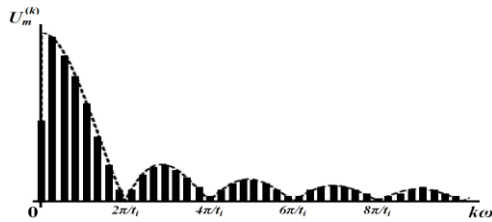


Рис. 2. АЧХ силового процесу

а сама функція $u(t)$ з урахуванням (1) – (3) в функціональній залежності від поточного значення змінної t_i визначатиме спектральні АЧХ та ФЧХ силового процесу (рис. 2) і матиме вигляд:

$$u(t; t_i) = \frac{t_i}{T} U_m \left(1 + 2 \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{k\omega t_i}{2}}{\frac{k\omega t_i}{2}} \cos k\omega t \right).$$

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. В. І. Сенько та ін., Електроніка і мікросхемотехніка. Силова електроніка, Київ, Україна: Каравела, 2013, 640 с.

Ведміцький Юрій Григорович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри теоретичної електротехніки та електричних вимірювань, Вінницький національний технічний університет.

Стадник Єгор — студент групи ЕМСА-23б, Вінницький національний технічний університет, Вінниця.

Іващенко Іван — студент групи 1ЕСМ-23б, Вінницький національний технічний університет, Вінниця.

Радченко Ілля — студент групи ЕМСА-23б, Вінницький національний технічний університет, Вінниця.

Vedmitsky Yuriy G. — PhD (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Theoretical Electrical Engineering and Electrical Measurements, Vinnytsia National Technical University., email: wjk@ukr.net.

Yegor Stadnik — student of EMSA-23b group, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.

Ivan Ivashchenko — student of 1ESM-23b group, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.

Ilya Radchenko — student of EMSA-23b group, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.

МЕТОДОЛОГІЯ ШВИДКОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ДИНАМІЧНИХ МОДЕЛЕЙ ВІТРОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

¹ Національний університет «Львівська політехніка»

Анотація

Запропоновано методологію швидкої ідентифікації динамічних моделей вітрових електростанцій для тестування систем керування активною та реактивною потужністю вітропарку. Трирівнева стратегія використовує стандартизовані моделі IEC 61400-27-1, структурне агрегування зі збереженням динаміки та параметричну ідентифікацію. Підхід забезпечує створення моделей за 5-6 днів із точністю відтворення перехідних процесів P та Q достатньою для тестування систем керування.

Ключові слова: вітрова електростанція, динамічна модель, активна потужність, реактивна потужність, IEC 61400-27-1, агрегування, моделювання, автоматизація, системи керування.

Abstract

A methodology for rapid identification of dynamic wind farm models for testing active and reactive power control systems is proposed. The three-level strategy uses IEC 61400-27-1 standardized models, structure-preserving aggregation, and parametric identification. The approach enables model creation in 5-6 days with sufficient accuracy for control system testing.

Keywords: wind farm, dynamic model, active power, reactive power, IEC 61400-27-1, aggregation, modeling, automation, control systems.

Вступ

Системи керування вітропарком виконують диспетчеризацію активної (P) та реактивної (Q) потужності між турбінами. Для тестування необхідні динамічні моделі, що точно відтворюють перехідні процеси при зміні уставок P_{ref} та Q_{ref} [1]. Типовий час відгуку: P – 2-5 с (обмежується приводом кута атаки), Q – 50-200 мс (інверторне керування).

Мета роботи – створення практичної методології швидкої ідентифікації моделей для тестування алгоритмів керування P та Q при мінімальних витратах часу.

Результати дослідження

Рівень 1. Стандартизовані моделі IEC 61400-27-1. Генеричні динамічні моделі для турбін типу 3 (DFIG) та 4 (FSC) включають: контур регулювання P з PI-регулятором, контур Q/U з динамікою першого порядку, обмеження P - Q можливостей: $Q_{max} = \pm\sqrt{(S^2 - P^2)}$. Час імплементації 1-2 дні, точність ± 5 -10% для P , ± 8 -12% для Q .

Рівень 2. Структурне агрегування. N турбін агрегуються в еквівалентну з масштабуванням інерції ($J_{agg} = N \times J_{turb}$) при збереженні постійних часу та коефіцієнтів регуляторів. Критично важливо зберегти динаміку відгуку. Мережа агрегується до еквівалентного опору. Час 1-2 дні, точність ± 10 -15%.

Рівень 3. Параметрична ідентифікація. При наявності степ-тестів (стрибок уставки P/Q на ± 10 -20%) виконується ідентифікація передатних функцій методом найменших квадратів. Валідація на провалах напруги та рампах потужності. Час 2-3 дні, точність ± 5 % для P , ± 7 % для Q .

Перехідна характеристика P : час наростання (5-95%) ± 20 %, перерегулювання ± 3 %; Перехідна Q : час відгуку ± 30 %, усталене значення ± 10 %; P - Q діаграма: правильні обмеження Q при різних P . День 1: оцінка даних; День 2-3: імплементація моделей; День 4-5: валідація; День 6: тестування алгоритмів.

Висновки

Методологія забезпечує побудову динамічних моделей за 5-6 днів із достатньою точністю для тестування систем керування P та Q . Ключові аспекти: збереження динамічних властивостей при агрегуванні, моделювання взаємозв'язку каналів P - Q , відтворення обмежень згідно діаграми можливостей.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Hansen A. D., Sørensen P., Iov F., Blaabjerg F. Centralised power control of wind farm with doubly fed induction generators // Renewable Energy. – 2006. – Vol. 31, No. 7. – P. 935-951.
2. IEC 61400-27-1:2020. Wind energy generation systems – Part 27-1: Electrical simulation models – Generic models. IEC, 2020.

Курилко Назарій Васильович — аспірант кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, Інститут енергетики та систем керування, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, e-mail: nazar.v.kurylko@lpnu.ua

Науковий керівник: **Федоришин Роман Миронович** — д-р техн. наук, доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, Інститут енергетики та систем керування, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів

ПЕРСПЕКТИВИ ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТУ З ВИКОРИСТАННЯМ КРЕМНІЄВИХ БАТАРЕЙ

^{1,3} Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова

² Київський фаховий коледж міського господарства Таврійського національного університету імені В.І.Вернадського,

Анотація

Розглядаються питання підвищення енергоефективності автономних джерел живлення електричного транспорту різного призначення за рахунок застосування кремнієвмісних анодів у літій-іонних акумуляторних батареях.

Ключові слова: електричний транспорт, автономні джерела живлення, кремнієвмісний анод, електромобіль, безпілотник, енергоефективність

Abstract

The article discusses issues related to improving the energy efficiency of autonomous power sources for electric vehicles of various purposes through the use of silicon-containing anodes in lithium-ion batteries.

Keywords: electric transport, autonomous power sources, silicon-containing anode, electric vehicle, unmanned aerial vehicle, energy efficiency

Вступ

Електричний транспорт стає ключовим елементом декарбонізації мобільності і міської логістики. Поєднання прогресу у акумуляторних батареях, зарядній інфраструктурі та системах керування вже забезпечує зниження викидів і витрат на паливо, а також нові сервіси, зокрема, типу живлення мережі від авто [1, 2]. Протягом найближчих років визначальним чинником буде стрибок у густині енергії та швидкості заряджання завдяки переходу від графітових до кремнієвмісних анодів у літій-іонних елементах. Саме ця зміна обіцяє більший запас ходу без нарощування маси акумулятора. Для контексту: у Євросоюзі вже зафіксовано нормативну траєкторію до нульових викидів від нових авто, що прискорює інновації в батареях та інфраструктурі [3–8].

Основні результати

1. Драйвери розвитку

1. Екологічні цілі. Оновлені норми ЄС з викидів для нових легкових авто задають повну декарбонізацію з 2035 року. Це спонукає автовиробників до масового переходу на батарейні рішення і одночасно до підвищення ефективності виробництва елементів живлення [1, 2].
2. Інфраструктура. У 2024 році глобально додано понад 1.3 мільйона публічних зарядних точок. В ЄС діє регламент AFIR, який зобов'язує мати швидкі зарядні станції щонайменше через кожні 60 км на магістралях і нарощувати загальну потужність мережі [3].
3. Важкий транспорт. Для вантажівок формується стандарт мегаватного заряджання MCS, що дозволяє скорочувати час простою і переводити на електротягу далекобійні маршрути. Паралельно розгортаються мегачарджери для Tesla Semi з потужністю до одного мегавата [4].

4. Мобільні роботи, безпілотні та маршрутні транспортні засоби – системи прискореного заряду з урахуванням технологічних обмежень та графіків руху.

2. Технологічні тенденції в електротранспорті

1. Зростання енергоємності елементів і покращення холодної поведінки.
2. Інвертори на базі SiC і високочастотні драйвери, що зменшують втрати і нагрів[3].
3. Двонапрямне заряджання. Стандарт ISO 15118-20 визначає обмін повідомленнями для віддачі енергії назад у мережу. Це створює основу для сервісів V2G і балансування піків[5].
4. Мегаватні конектори для електробусів, автобусів та фур із мінімальним часом зарядки [4].

3. Кремнієвісні аноди замість графітових

Чому кремній. Теоретична питома ємність кремнію становить близько 3579 мА·год на грам, що майже у десять разів вище за графіт. Це означає потенціал для істотно більшої енергії у тому ж об'ємі батареї або зниження маси за збереження запасу ходу. Головний виклик — об'ємне розширення частинок під час літіювання до трьохсот відсотків, що руйнує електрод і скорочує ресурс. Тому в промисловості застосовують кремній у композиції з вуглецем, наноструктури, спеціальні зв'язувальні полімери, попереднє літіювання і нові електроліти[6–8].

Де це вже працює:

- **Sila** оголосила про впровадження кремнієвого анода Titan Silicon у серійний електро-G-Class від Mercedes. Компанія декларує підвищення енергоємності елементів і збільшення запасу ходу без збільшення батарейного пакета. Це перший публічний кейс застосування висококремнієвого анода у серійному позашляховику преміум класу[6].
- **Amprius** поставляє кремнієві комірки з надвисокою питомою енергією для авіації і безпілотників. Публічні дані підтверджують платформи з 450 до 500 ват-годин на кілограм і нещодавні великі замовлення, що свідчить про масштабування виробництва. Хоч це не легкові авто, але такі рішення показують технічну зрілість матеріалу та швидкість заряду[7].
- **Group14** розгортає промислові потужності SCC55 — кремній-вуглецевий композит як заміну графіту. Нещодавнє фінансування і контроль над корейським заводом підтверджують перехід до великих обсягів постачання, у тому числі для транспортних застосувань.
- **Enovix** демонструє батареї з повністю кремнієвим анодом для смартфонів з рекордною об'ємною густиною і дуже швидким заряджанням. Споживча електроніка зазвичай є першим етапом перед масштабуванням у транспорт, тому ці показники важливі для дороги у електромобілі [6-8] .

Очікуваний ефект для електромобілів

1. Більший запас ходу за незмінної маси пакета або легший пакет за тієї ж дальності.
2. Вища приймальна здатність струму і менший час заряджання. Для міського транспорту це зменшує час простоїв в депо, а для міжміського — у меншу потребу в устаткуванні при мегаватних піках на станції.
3. Потенційно краща робота при низьких температурах завдяки іншим параметрам анода і електроліту, хоча це залежить від конкретної рецептури і системи керування теплом.

Залишкові виклики

1. Ресурс через розширення частинок і деградацію міжфазного шару. Дорога - мікроструктурування кремнію, композити SiOx, електроліти, що формують стабільну міжфазу.
2. Вартість і масштабування виробництва. Потрібні заводи активного матеріалу і сумісні лінії формування електродів. Останні угоди у галузі показують рух до десятків гігават-годин потужностей на рік, але у легковому автопромі масовий перехід триватиме кілька циклів поколінь батарей.

3. Інтеграція у повний пакет. Кремнієві аноди часто потребують оновлених профілів заряджання, інакше скорочується ресурс. Тут важливі BMS, передзарядні стратегії, тепловий менеджмент і сертифікація безпеки.

Висновки

Електричний транспорт переходить від етапу раннього впровадження до фази технологічної оптимізації. Ключова зміна найближчих років — поява висококремнієвих анодів у масових батарейних платформах. Це дає шанс збільшити запас ходу без нарощування маси і пришвидшити заряджання. Комерційні новини від Sila, Amprius, Group14 і інші кейси демонструють готовність матеріалів до ринку. На стороні інфраструктури ЄС уже виставив конкретні вимоги до густини струму і потужності мережі, а для вантажного сегмента формується мегаватний стандарт. Для України поєднання цих трендів означає можливість пришвидшити оновлення технічних засобів електротранспорту і зменшити експлуатаційні витрати, якщо синхронізувати стандарти і завчасно планувати мережеву інтеграцію.

Список використаної літератури

- [1] Європейський парламент та Рада ЄС. Regulation EU 2023 851 amending Regulation EU 2019 631 on CO2 emission performance standards for new passenger cars and vans. Official Journal of the European Union, 2023.
[2] Європейський парламент. EU ban on sale of new petrol and diesel cars from 2035 explained. Європейський парламент, 2023.
[3] International Energy Agency. Global EV Outlook 2025. Париж, IEA, 2025.
[4] Charging Interface Initiative CharIN eV. Megawatt Charging System MCS overview. CharIN eV, 2024.
[5] International Organization for Standardization. ISO 15118 20 Road vehicles Vehicle to grid communication interface Part 20 Second generation network and application protocol requirements. Женева, ISO, 2022.
[6] Sila Nanotechnologies. Titan Silicon selected by Mercedes Benz for the electric G Class. Прес реліз компанії, 2024.
[7] Unmanned Systems Technology. Amprius unveils high performance lithium ion battery for demanding aviation applications. Unmanned Systems Technology, 2025.
[8] Reuters. Porsche backed Group14 closes new funding takes control of joint venture battery material unit. Reuters, 2025.

Далека Василь Хомич – док. техн. наук, професор кафедри електричного транспорту Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова, E-mail – dalekavf@ukr.net

Фуртат Сергій Олександрович, викладач Київського фаховий коледж міського господарства Таврійського національного університету імені В.І.Вернадського, E-mail – furtatsergij@gmail.com

Величко Артем Сергійович, магістрант Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова, E-mail – Artem.Velychko2@kname.edu.ua

Daleka Vasyl Khomych – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Electric Transport, Kharkiv National University of Urban Economy named after O.M. Beketov, E-mail – dalekavf@ukr.net

Furtat Serhiy Oleksandrovych, Lecturer, Kyiv Professional College of Urban Economy, Tavria National University named after V.I. Vernadsky, E-mail – furtatsergij@gmail.com

Velychko Artem Serhiyovych, Master's student, Kharkiv National University of Urban Economy named after O.M. Beketov, E-mail – Artem.Velychko2@kname.edu.ua

ДЕКОМПОЗИЦІЯ ПОВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ ЗА НЕСИНУСОЇДАЛЬНИХ УМОВ

Національний університет «Львівська політехніка»

Анотація

Робота стосується дослідження енергетичних спотворень, які вносять напівпровідникові перетворювачі в роботу систем електропостачання, що проявляється у погіршенні якості напруги в електричних мережах та зниженні їх енергетичної ефективності. Причиною таких явищ є циркуляція в системах передачі та розподілу електроенергії неактивних складових повної потужності, облік та компенсація яких є важливою задачею розумної експлуатації електричних мереж. Ця проблема особливо актуальна у зв'язку з поширенням в системах передачі та розподілу електроенергії пристроїв керування потоками потужності на основі керованих напівпровідникових вентилів, що супроводжується порушеннями електромагнітної рівноваженості електроустановок. Для прийняття рішень щодо підвищення енергетичної ефективності систем електропостачання із силовими статичними перетворювачами важливим є розпізнавання і визначення компонент повної електричної потужності та трактування ролі і впливу напівпровідникових вентильних елементів на процеси енергообміну в електричних системах. Метою роботи є декомпозиція повної потужності на компоненти за несинусоїдальних умов. Проведено дослідження складових потужності в електричному колі з джерелом змінної напруги, що живить резистивне навантаження через повністю керований двоопераційний тиристор. За основу декомпозиції потужності прийнято підхід стандарту IEEE Std. 1459-2010, згідно якого потік вектора Пойнтінга подається спектром ортогональних складових миттєвої потужності. Отримані відповіді на ряд питань про участь напівпровідникових елементів силових перетворювачів, як у загальному балансі потужності, так і в локальних балансах її компонент. Показано, що джерелом потужності спотворення є нелінійні властивості та фазове керування провідного стану тиристорів. Тиристор є джерелом реактивної потужності зсуву, а також активної потужності гармонік неосновної частоти. Наведено чисельний приклад, візуалізацію та аналіз результатів розрахунку балансу потужності.

Ключові слова: електрична потужність, вектор Пойнтінга, аналіз Фур'є, тиристор, електрична мережа.

Abstract

The work concerns the study of energy distortions introduced by semiconductor converters into the operation of power supply systems, which manifests itself in the deterioration of voltage quality in electrical networks and the reduction of their energy efficiency. The cause of such phenomena is the circulation of non-active components of apparent power in electric power transmission and distribution systems, the accounting and compensation of which are important tasks for the intelligent operation of electrical networks. This problem is especially relevant due to the increasing use of power flow control devices based on controllable semiconductor valves in transmission and distribution systems, which leads to disturbances of the electromagnetic balance of electrical installations. For making decisions aimed at improving the energy efficiency of power supply systems with power electronic converters, it is important to identify and determine the components of the total electric power and to interpret the role and influence of semiconductor valve elements on the energy exchange processes in electrical systems. The aim of the work is the decomposition of apparent power into components under nonsinusoidal conditions. The study examines the components of power in an electric circuit with an AC voltage source supplying a resistive load through a fully controlled bidirectional thyristor. The decomposition of power is based on the approach of IEEE Std. 1459-2010, according to which the Poynting vector flux is represented by a spectrum of orthogonal components of instantaneous power. Answers were obtained to a number of questions regarding the participation of semiconductor elements of power converters both in the overall power balance and in the local balances of its components. It is shown that the source of distortion power is the nonlinear characteristics and phase control of the thyristor's conducting state. The thyristor acts as a source of displacement reactive power as well as active power of non-fundamental frequency harmonics. A numerical example, visualization, and analysis of the calculated power balance results are presented.

Keywords: electric power, Poynting vector, Fourier analysis, thyristor, electric network.

Вступ

Декомпозиція повної потужності необхідна для уточненого зведення балансів у вузлах електричних мереж, побудови належної системи обліку та обґрунтування заходів щодо компенсації неактивних складових потужності з метою підвищення енергетичної ефективності роботи систем передачі та розподілу електроенергії. Актуальність декомпозиції потужності для несинусоїдальних умов пов'язана з тим, що електроенергія стає все більш нелінійною. З переходом на технологію побудови розумних електричних систем (Smart Grid) зростає число інверторних систем відбору енергії від джерел постійного струму (DC/AC) та впроваджуються гнучкі системи пересилання змінного струму (FACTS), побудовані на використанні сучасних досягнень енергетичної електроніки [1]. Під час розрахунків балансу потужності в системах з несинусоїдальними умовами необхідно враховувати

складові потужності, які безпосередньо пов'язані з вентильними елементами перетворювальної схеми. Незважаючи на те, що миттєва потужність ідеального напівпровідникового вентиля протягом періоду електромагнітних процесів дорівнює нулю, інтегральні складові потужності обов'язкові, як і для будь якого іншого пасивного елемента, що пропускає струм. Виключивши вентиля з процесу енергообміну, досягти балансу потужностей неможливо [2].

Метою роботи є декомпозиція повної потужності для електричних мереж з несинусоїдальними напругами та струмами, яка задовольняє вимогам теореми Теллєгена для консервативних систем.

Виклад основного матеріалу

Майже 100 років тому С. Budeanu (1927) запропонував спектральний підхід до розкладу повної потужності для несинусоїдальних умов і вперше додав до активної та реактивної потужності третю складову, назвавши її потужністю спотворення [3]:

$$S = \sqrt{P^2 + Q_B^2 + D_B^2}, \quad (1)$$

де активну та реактивну потужність С. Budeanu визначають на основі розкладу напруги та струму в ряд Фур'є, перемноженням гармонік одного порядку:

$$P = \sum_h^v U_h I_h \cos \varphi_h, \quad Q_B = \sum_h^v U_h I_h \sin \varphi_h. \quad (2)$$

На той час не існувало засобів вимірювання складових розкладу (1) і в 1932 р. S. Fryze запропонував інтегральний підхід, який подає повну потужність в часовій області [3]

$$S = \sqrt{P^2 + Q_F^2}, \quad (3)$$

розкладом на активну та реактивну потужність S. Fryze з поданням струму на дві ортогональні складові, увівши відповідні провідності мережі. Ця модель, будучи зрозумілою для синусоїдальних умов, не розкриває фізичного механізму передачі потужності для несинусоїдальних сигналів і не надає змоги обчислення втрат.

Подальший розвиток теорії потужності для несинусоїдальних умов супроводжувався в основному пропозиціями щодо вдосконалення наведених вище двох підходів [4]. Знаковою віхою в теорії потужності став стандарт ІЕЕЕ, щодо визначень для вимірювання компонент потужності за спотворених та неспотворених умов [5]. Згідно нього повну потужність розкладають на складові фундаментальної частоти та на складові інших частот:

$$S = UI = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2 + D_1^2 + D_U^2 + P_H^2 + D_H^2}, \quad (4)$$

де P_1 , Q_1 – активна та реактивна потужності за першою гармонікою, як домінують в електромережах; D_1 – потужність спотворення струму; D_U – потужність спотворення напруги; P_H – гармонічна активна потужність, D_H – гармонічна потужність спотворення. Розклад (4) по суті є вдосконаленням підходу С. Budeanu на основі аналізу фізичного механізму перетікання потужності в електричній мережі [5]. З теорії електромагнітного поля відомо, що потік електромагнітної енергії подається вектором Пойнтінга, який дозволяє досліджувати потоки потужності в просторі і часі та енергетичну взаємодію на мікроскопічному рівні [6-8]:

$$\vec{\Pi} = \vec{E} \times \vec{H}, \quad (5)$$

де $\vec{E}$ і $\vec{H}$ – вектори напруженості електричного та магнітного полів. Цей вектор характеризує щільність швидкості потоку енергії, тобто щільність потужності, яка передається чи перетворюється. За несинусоїдальних умов гармонічні напруги та струми утворюють безліч складових $\vec{\Pi}$, які можна розділити на такі, що утворені взаємодією компонент електричного поля $\vec{E}_m$ з компонентами магнітного поля $\vec{H}_m$ цієї ж частоти, а також на такі, що утворені відповідними складовими різних частот:

$$\vec{\Pi} = \sum_{m=1} \vec{E}_m \times \vec{H}_m + \sum_{m \neq n} \vec{E}_m \times \vec{H}_n. \quad (6)$$

На макрорівні потік вектора Пойнтінга (6) можна подати миттєвою потужністю:

$$p = ui = \sum_h u_h \sum_h i_h = \sum_{h=1} u_h i_h + \sum_{m \neq n} u_m i_n = u_1 i_1 + u_H i_H + u_1 i_H + i_1 u_H + \sum_{m=1}^{v-1} \sum_{n=m+1}^v (u_m i_n + u_n i_m), \quad (7)$$

де $i_H = \sum_{h \neq 1} i_h$, $u_H = \sum_{h \neq 1} u_h$ – сума миттєвих гармонік струмів та напруг (окрім першої).

Миттєву потужність, утворену взаємодією гармонік напруги і струму однієї частоти, можна розкласти на дві ортогональні складові. Перша – активна гармонічна миттєва потужність, яка утворена активною

складовою гармоніки струму, що перебуває у фазі з напругою однойменної гармоніки. Вона є мірою швидкості однонаправленого не від'ємного потоку енергії від джерела до навантаження. Друга – реактивна, гармонічна, миттєва коливна з подвійною частотою потужність між джерелом та навантаженням, утворена струмом, який перебуває у квадратурі стосовно напруги, із нульовим середнім значенням швидкості потоку, тобто не передає енергію від джерела до навантаження. Миттєва потужність, утворена взаємодією гармонік напруги і струму різних частот, є потужністю спотворення електричного та магнітного полів, що вносяться відповідними гармоніками напруг і струмів. В неї багато спільного з фундаментальною реактивною потужністю. Вони неактивні та завантажують мережу пересилання додатковими струмами. Потужності спотворення характеризують кількісно гармонічне забруднення, що проявляється у додаткових втратах активної потужності та зниженні якості електроенергії.

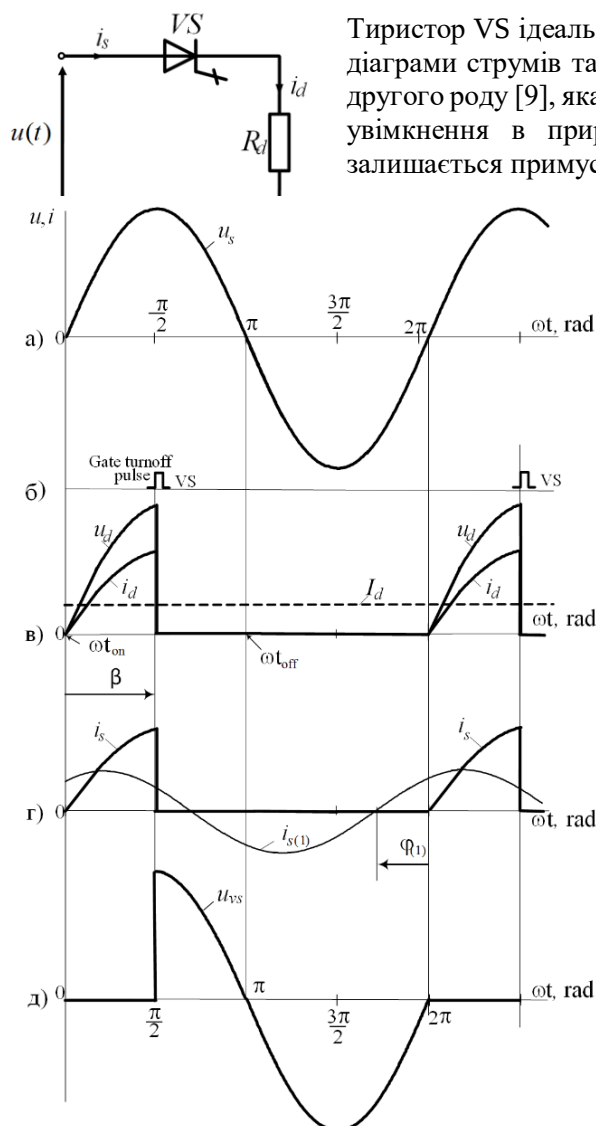
Перейшовши від миттєвих до середньоквадратичних значень отримаємо наступні вирази для компонент повної потужності [5]:

$$P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1, \quad Q_1 = U_1 I_1 \sin \varphi_1, \quad D_I = U_1 I_H, \quad D_U = U_H I_1, \quad P_H = \sum_{h \neq 1} U_h I_h \cos \varphi_h, \quad D_H = \sqrt{(U_H I_H)^2 - P_H^2}, \quad (8)$$

де $U_H = \sqrt{\sum_{h \neq 1} U_h^2}$, $I_H = \sqrt{\sum_{h \neq 1} I_h^2}$ – ефективне значення гармонік напруги та струму не фундаментальної частоти відповідно. Активна потужність, яку споживає навантаження визначають, як $P = P_1 + P_H$.

Результати дослідження

Для ілюстрації розкладу потужності за несинусоїдальних умов розглянемо енергетичний баланс для найпростішої системи, яка включає джерело синусоїдальної напруги $u(t) = U_m \sin \omega t$ та послідовно увімкнені двоопераційний фазово керований тиристор і активне навантаження (рис. 1).



Тиристор VS ідеальний, керований закриванням. На рис. 2 наведено часові діаграми струмів та напруг випрямляча для режиму однорідної комутації другого роду [9], яка розвантажує тиристор від потужності комутації під час увімкнення в природний момент часу ωt_{on} (рис. 2,в) відкривання і залишається примусовим тільки вимикання керуючим імпульсом у момент часу β , раніше природнього моменту часу закривання ωt_{off} (рис. 2,в). Такий режим керування тиристора з випередженням закривання (режим "анти-тиристора", або "дуалтиристора" [9] характеризується випереджувальним зсувом основної гармоніки струму відносно напруги живлення на кут $\varphi(1)$, що означає генерування в мережу реактивної потужності зсуву [10,11].

Для отримання складових потужності (4), пов'язаних з окремими елементами схеми (рис.1), за формулами (8) розкладаємо вирази для миттєвих значень струмів та напруг схеми рис. 1 у тригонометричний ряд Фур'є. Враховуючи, що напруга живлення синусоїдальна, на інтервалі часу $0 \leq \omega t \leq \beta$ (рис. 2) провідного стану тиристора струм живлення описується рівнянням

$$i_s = i_d = \frac{U_m}{R} \sin(\omega t). \quad (9)$$

Розклад струму в тригонометричний ряд Фур'є. Остаточні вирази для амплітуд косинусного та синусного коефіцієнтів ряду мають вигляд:

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^\beta \frac{U_m}{R_d} \sin \omega t d\omega t = \frac{U_m}{2\pi R_d} (1 - \cos \beta), \quad (10)$$

Рис. 2. Часові діаграми струмів і напруг

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{\beta}^{2\pi} u_{vs}(\omega t) \cos(n\omega t) d\omega t = \frac{U_m}{2\pi} \left\{ -\frac{\cos[(1-n)2\pi] - \cos[(1-n)\beta]}{1-n} - \frac{\cos[(1+n)2\pi] - \cos[(1+n)\beta]}{1+n} \right\}, \quad (11)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i_s(\omega t) \sin n\omega t d\omega t = \frac{U_m}{\pi R_d} \int_0^{\beta} \sin \omega t \sin n\omega t d\omega t = \frac{U_m}{2\pi R_d} \left\{ \frac{\sin[(1-n)\beta]}{1-n} - \frac{\sin[(1+n)\beta]}{1+n} \right\}, \quad (12)$$

де n – номер гармоніки.

Косинусний коефіцієнт ряду Фур'є для основної гармоніки ($n=1$):

$$a_1 = \frac{U_m}{4\pi R_d} (1 - \cos 2\beta). \quad (13)$$

Синусний коефіцієнт ряду Фур'є для основної гармоніки ($n=1$):

$$b_1 = \frac{U_m}{4\pi R_d} (2\beta - \sin 2\beta). \quad (14)$$

Розклад напруги на тиристорі в тригонометричний ряд Фур'є. Остаточні вирази для амплітуд косинусного та синусного коефіцієнтів ряду мають вигляд:

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u_{vs}(\omega t) d\omega t = \frac{1}{2\pi} \int_{\beta}^{2\pi} U_m \sin \omega t d\omega t = \frac{U_m}{2\pi} (1 - \cos \beta), \quad (15)$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{\beta}^{2\pi} u_{vs}(\omega t) \cos(n\omega t) d\omega t = \frac{U_m}{2\pi} \left\{ -\frac{\cos[(1-n)2\pi] - \cos[(1-n)\beta]}{1-n} - \frac{\cos[(1+n)2\pi] - \cos[(1+n)\beta]}{1+n} \right\}, \quad (16)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{\beta}^{2\pi} u_{vs}(\omega t) \sin(n\omega t) d\omega t = \frac{U_m}{2\pi} \left\{ \frac{\sin[(1-n)2\pi] - \sin[(1-n)\beta]}{1-n} - \frac{\sin[(1+n)2\pi] - \sin[(1+n)\beta]}{1+n} \right\}, \quad (17)$$

$$a_1 = \frac{U_m}{4\pi} [\cos(2\beta) - 1], \quad b_1 = \frac{U_m}{2\pi} \left[2\pi - \beta + \frac{\sin(2\beta)}{2} \right]. \quad (18)$$

Амплітуду та фазу n -ї гармоніки струму (напруги) визначаємо, як:

$$I_{1m(n)} = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}, \quad \varphi_n = \arctg(b_n/a_n). \quad (19)$$

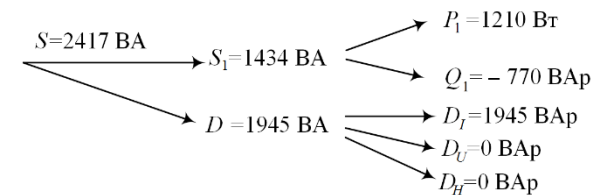


Рис. 3 Дерево повної потужності для джерела живлення

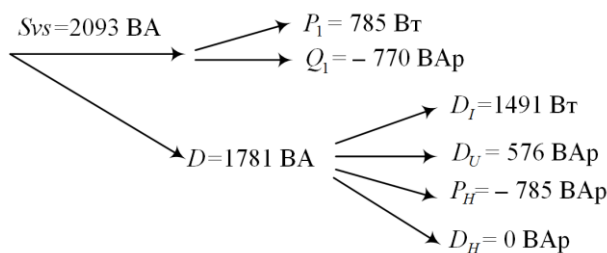


Рис. 4 Дерево потужності для тиристора

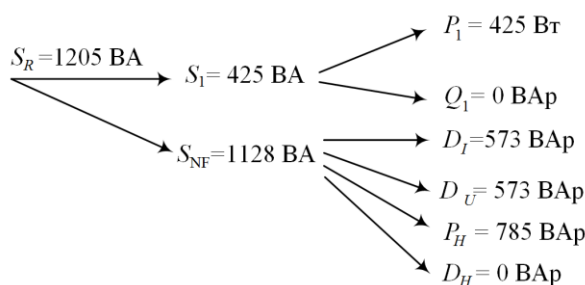


Рис. 5 Дерево потужності для вітки навантаження

Чисельний приклад розрахунку складових потужності випрямляча виконано для наступних вхідних даних: напруга живлення $U=220$ В, опір навантаження $R_d=10$ Ом, кут закривання тиристора $\beta=90$ ел. град. Для заданих умов середньоквадратичні значення струму $10,98$ А, струму основної частоти $I_1=6,5$ А, гармонічного струму $I_H=8,85$ А, а фазовий кут основної гармоніки $\varphi_1 = 32,48$ ел. град.

На рис.3 наведено дерево зі складовими потужності джерела живлення. Від'ємний знак реактивної потужності на частоті джерела напруги означає, що її генерує випрямляч без реактивних елементів. З рис. 4 бачимо, що власне тиристор є джерелом реактивної потужності зсуву. Від'ємний знак активної гармонічної потужності означає, що тиристор є джерелом спотворень. Ця потужність повністю скомпенсована активною потужністю за основною гармонікою і, таким чином, еквівалентна активна потужність не пов'язана з ідеальним фазово керованим тиристором. У активному опорі навантаження сума активних потужностей за основною та іншими гармоніками дорівнює активній потужності, яку на першій гармоніці віддає до навантаження джерело живлення. Згідно

теореми Теллегена [12] у її енергетичному тлумаченні в електричній системі потужність джерела дорівнює сумі потужностей її елементів. Для нашого випадку виконуються наступні баланси: за активною потужністю $P_S = P_{VS} + P_R$, за реактивною потужністю основної частоти $Q_{IS} = Q_{1VS} + Q_{1R}$ та повною потужністю $S^2 = S_{VS}^2 + S_R^2$.

Висновки

Встановлено, що ключовий елемент в електричній системі є джерелом потужностей спотворення, які виникають в результаті збудження додаткових коливань електромагнітного поля. Окреслено компоненти потужності пов'язані з порушенням електромагнітної рівноваженості електричних систем за несинусоїдальних умов. Розглянута декомпозиція повної потужності підтверджена чисельним розрахунком балансу повної потужності та її складових і може бути основою для побудови енергетичних моделей електричних систем із силовими напівпровідниковими перетворювачами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1]. Кириленко О. В., Стогній Б. С., Денисюк С. П., Сопель М. Ф. SMART-моніторинг електроенергетичних систем. *Технічна електродинаміка*, 2024, № 5, С. 48-62.
- [2]. Новский В.А., Жарский Б.К., Голубев В.В. Баланс мощностей в электрических цепях с ключевыми элементами. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2011. Вип 48. С. 103-113. .
- [3]. Жежеленко І. В., Півняк Г. Г., Трофімов Г. Г., Папайка Ю. А. *Реактивна потужність в електричних мережах*. – Дніпро: НТУ «Дніпровська політехніка», 2020. – 72 с.
- [4]. Adrian A. Adăscăltei, Alexander E. Emanuel. Evolution of the Electric Power Componensation Definitions. *Annals of the University of Craiova, Electrical Engineering series*. 2015. No 39. Pp. 206–211
- [5]. *IEEE Std. 1459-2010. Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Non-Sinusoidal, Balanced or Unbalanced Conditions*, New York, 2010.
- [6]. Emanuel A. E. *Power definitions and the physical mechanism of power flow*. – Hoboken : John Wiley & Sons, 2010. – ISBN 978-0-470-66074-4.
- [7]. Тонкаль В. Є., Новосельцев А. Є., Денисюк С. П. *Баланс енергій в силових колах*. – Київ : Наукова думка, 1992. – 192 [8]. Emanuel A. E. "Poynting vector and the physical meaning of nonactive powers" // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. – 2005. – Vol. 54, No. 4. – P. 1457–1462.
- [9]. Масвський О. А. *Енергетические показатели вентиляных преобразователей*. – М. : Энергия, 1978. – 320 с.
- [10]. Хворост М. Види комутації та енергетичні характеристики в електричних колах з ключовими елементами / М. В. Хворост, Ю. П. Гончаров, М. В. Панасенко, В. В. Замаруєв, В. А. Чумак, Н. М. Панасенко, В. Ю. Хворост, В. С. Нікулін // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2005. – № 4. – С. 67–72.
- [11]. Федів Є. І., Сівакова О. М. "Складові потужності тиристорного регулятора напруги з активним навантаженням" // *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. – 2024. – № 68. – С. 100–105. – DOI: 10.15407/publishing2024.68.100.
- [12]. Tellegen B. D. H. "A general network theorem with applications" // *Philips Research Reports*. – 1952. – Vol. 7. – P. 259–269.

Федів Євген Ігорович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електроенергетики та систем управління

Сівакова Ольга Михайлівна – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електроенергетики та систем управління
Національний університет «Львівська політехніка», Львів

Fediv Yevhen Ihorovych – Cand. of Tekhn. Sc., Assistant Professor, Department of of Electric Power Engineering and Control Systems

Sivakova Olha Mykhailivna – Cand. of Tekhn. Sc., Assistant Professor, Department of of Electric Power Engineering and Control Systems

ПОБУДОВА МІКРОМЕРЕЖ З ДОДАТКОВОЮ ГЕНЕРАЦІЄЮ ВІД МОБІЛЬНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ НА БАЗІ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

¹ Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут»

² Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

³ Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Анотація

Запропоновано методику балансування потужності у мікромережі низької напруги за рахунок додаткового отримання гарантованої потужності від мобільних електростанцій на базі відновлюваних джерел енергії при їх мігруючому підключенні у різних точках системи. Виконано аналіз режимів роботи мікромережі та досліджена ефективність розробленої методики у питаннях забезпечення надійності електропостачання споживачів.

Ключові слова: мобільна електростанція, мікромережа, відновлювана енергетика, баланс потужності.

Abstract

A method for balancing power in a low-voltage microgrid by obtaining additional guaranteed power from mobile power stations based on renewable energy sources when they are connected at different points in the system has been proposed. An analysis of the microgrid operating modes has been performed and the effectiveness of the developed methodology in ensuring the reliability of electricity supply to consumers has been investigated.

Keywords: mobile power plant, microgrid, renewable energy, power balance.

Вступ

Відомо [0, 2] що на сьогоднішній розвиток інтелектуальних мереж є основою подальшої повної перебудови структури електроенергетичних систем, яка базується на принципах децентралізації.

В даній роботі пропонується розглянути та дослідити ефективність структури мікромережі з додатковою генерацією від мобільних фотоелектричних станцій.

Результати досліджень

Застосування мобільних фотоелектричних станцій у якості джерел розосередженої генерації є ефективним рішенням балансування потужності у мікромережах низької напруги [1]. Структура запропонованої мікромережі наведена на рис 1.

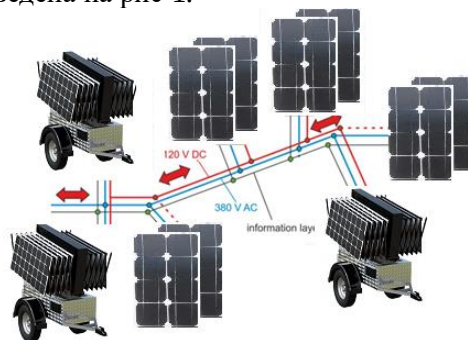


Рис. 1 – Структура мікромережі з додатковою генерацією від мобільних сонячних електростанцій

Перевагою такої структури є можливість швидкої її перебудови з отриманням гарантованої потужності у будь якій точці підключення, що також змінює розподілення потужностей у системі електропостачання. При цьому мобільні фотоелектричні станції мають у своєму складі акумуляторні батареї, що дозволить збільшити загальний об'єм системи накопичення електричної енергії у мікромережі.

Слід зазначити, що при такій організації структури мікромережі мобільні фотоелектричні станції можуть бути як генеруючими джерелами енергії, так і її споживачами, що також сприяє регулюванню балансу потужностей у системі.

Співвідношення для балансу потужності у мікромережі у випадку, коли мобільні фотоелектричні станції підключені у якості джерела енергії, тобто коли потужності стаціонарних електростанцій недостатньо для покриття навантаження споживачів, мають вигляд:

$$\begin{aligned} P_{сп} &> P_{фес}; \\ P_{сп} &= P_{фес} + P_{мфес}; \\ P_{мфес} &= P_{мфеп} + P_{АКБ}, \end{aligned} \quad (1)$$

де $P_{сп}$ – потужність навантаження споживачів; $P_{фес}$ – потужність стаціонарних фотоелектричних станцій; $P_{мфес}$ – потужність розгорнутих мобільних фотоелектричних станцій; $P_{мфеп}$ – потужність, що генерується фотопанелями; $P_{АКБ}$ – потужність акумуляторних батарей мобільної електростанції.

Рівняння балансу потужності у мікромережі для випадку, коли мобільні фотоелектричні станції підключені у якості споживача, за умови низького заряду АКБ:

$$\begin{aligned} P_{сп} &< P_{фес}; \\ 0,2P_{АКБ} &\leq P_{АКБ} \leq 0,8P_{АКБ} \\ P_{сп} + P_{АКБ} &= P_{фес} + P_{мфеп}. \end{aligned} \quad (2)$$

Задля ефективного розподілу потужностей у системі та узгодженості процесів генерування, зберігання та споживання електричної енергії у мікромережі необхідним є застосування інтелектуального керування.

Результати виконаного аналізу режимів роботи досліджуваної мікромережі з мобільними фотоелектричними станціями довели, що запропонована структура мережі забезпечує високу ефективність та сприяє підвищенню надійності електропостачання споживачів.

Висновки

Запропонована структура мікромережі з додатковою генерацією від мобільних сонячних електростанцій забезпечує високу надійність електропостачання споживачів, при цьому вона має підвищенні показники енергоефективності. Інтелектуалізація процесів керування в мікромережі дозволяє використовувати мобільні фотоелектричні станції як у якості джерела, так і у якості споживача електричної енергії, що забезпечує ефективне балансування потужності у системі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] Савченко Н. П., Трет'як А. В., Довгалиук О. М. Перспективи застосування мобільних електростанцій як джерел розосередженої генерації у локальних електричних мережах / Системи управління, навігації та зв'язку. – 2023. – № 4(74). – С.63–66 doi: 10.26906/SUNZ.2023.4.063

[2] Шавьолкін О. О., Стаценко Д.В. Управління підключеною до мережі фотоелектричною системою для потреб об'єкту з можливістю підвищення потужності понад ліміт на споживання / Наукові праці ДонНТУ. Серія: «Електротехніка і енергетика». – 2024, № 1(30). – С. 14–21 doi:10.31474/2074-2630-2024-1-14-21

Савченко Наталія Панасівна — кандидат технічних наук, доцент, кафедра мехатроніки та електротехніки Національний аерокосмічний університет «Харківській авіаційний інститут», м. Харків, e-mail: natali_a_savchenko@ukr.net

Довгалиук Оксана Миколаївна — кандидат технічних наук, професор, кафедра передачі електричної енергії Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, e-mail: oksana.dovhaliuk@khp.edu.ua

Трет'як Андрій Валерійович — кандидат технічних наук, кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», м. Полтава, e-mail: rubanenkoae@ukr.net

Savchenko Natalia Panasivna — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Mechatronics and Electrical Engineering National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, e-mail: natali_a_savchenko@ukr.net

Dovhaliuk Oksana Mykolaivna — Candidate of Technical Sciences, Professor, Department of Electrical Energy Transmission National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, e-mail: oksana.dovhaliuk@khp.edu.ua

Tretyak Andriy Valeriyovych — Candidate of Technical Sciences, Department of Automation, Electronics and Telecommunications National University "Poltava Polytechnic named after Yuriy Kondratyuk", Poltava, e-mail: rubanenkoae@ukr.net

СТАТИСТИКА ПОШКОДЖЕНЬ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

Вінницький національний технічний університет

Анотація: Силові трансформатори є критично важливими елементами електроенергетичних систем, а їхній технічний стан безпосередньо впливає на надійність та ефективність роботи всієї мережі. Статистика пошкоджень силових трансформаторів є важливим інструментом для аналізу та моніторингу технічного стану електричного обладнання. Пошкодження трансформаторів можуть виникати через різні фактори, такі як механічні пошкодження, старіння ізоляції, перегрів, короткі замикання, дефекти виготовлення, а також неправильне експлуатаційне обслуговування. Аналіз статистичних даних про пошкодження дозволяє визначити основні причини відмов і їхній вплив на роботу електричних мереж.

Ключові слова: силовий трансформатор, пошкодження, дефект.

Abstract: Power transformers are critically important elements of power systems, and their technical condition directly affects the reliability and efficiency of the entire network. Power transformer damage statistics are an important tool for analyzing and monitoring the technical condition of electrical equipment. Transformer damage can occur due to various factors, such as mechanical damage, insulation aging, overheating, short circuits, manufacturing defects, as well as improper operational maintenance. Analysis of damage statistics allows you to identify the main causes of failures and their impact on the operation of electrical networks.

Keywords: power transformer, damage, defect.

Вступ

Силові трансформатори є одними з основних елементів енергетичних систем, що забезпечують ефективну передачу електричної енергії на великі відстані. Однак, як і будь-яке технічне обладнання, трансформатори можуть зазнавати різноманітних пошкоджень через механічні, електричні або термічні навантаження. Це може призвести до несанкціонованих відключень, збільшення витрат на ремонт, а також до потенційних аварій, що негативно впливають на стабільність роботи енергетичних мереж [1].

Аналіз статистики пошкоджень трансформаторів допомагає виявити основні фактори, що призводять до їхніх відмов, а також визначити ефективні методи профілактики та ремонту. Розуміння цих процесів є необхідним для підвищення надійності та економічної ефективності енергетичних систем, оскільки дозволяє оптимізувати графіки технічного обслуговування та забезпечити довгострокову безперервність функціонування інфраструктури.

Дослідження причин і типів пошкоджень трансформаторів дозволяє визначити тенденції в їхньому розвитку, а також оцінити ризики, пов'язані з різними умовами експлуатації. Відповідно, важливою частиною цього процесу є збір і аналіз статистичних даних щодо типових пошкоджень, що дозволяє на основі цих даних розробляти методи запобігання відмовам та здійснювати правильний вибір для профілактичного обслуговування [2].

Результати дослідження

Результати досліджень пошкоджень вузлів та деталей силових трансформаторів (СТ) свідчать про те, що, як в Україні, так за і кордоном, чимало з них припадає на пошкодження обмоток та магнітопроводів. Це доводить необхідність врахування стану цих елементів трансформатора під час його експлуатації [3]. Наразі єдине масштабне міжнародне дослідження відмов великих силових трансформаторів було проведено у 1983 році, коли було здійснено збір та аналіз даних про відмови трансформаторів з різних країн та регіонів. Це дослідження включало в себе велику кількість трансформаторів, що зазнали відмов у різних умовах експлуатації, та було націлене на виявлення закономірностей і факторів, що впливають на надійність цих критично важливих елементів енергетичних мереж.

У ході дослідження були визначені кілька важливих критеріїв, що впливають на ймовірність відмов трансформаторів, таких як рівень робочої напруги, вік обладнання, тип конструкції, а також умови експлуатації та навантаження, яким піддаються трансформатори в різних регіонах. Для кожної з категорій трансформаторів були розраховані відповідні коефіцієнти відмов, що дозволило створити більш точні моделі прогнозування технічного стану та ймовірності відмови обладнання в залежності

від різних факторів. Це дослідження стало основою для подальшого розвитку методів прогнозування відмов та вдосконалення технічних рішень в енергетичній галузі. Воно дозволило отримати важливі дані для створення рекомендацій щодо підвищення надійності, безпеки та довговічності силових трансформаторів, а також послужило важливим етапом у розробці нових стандартів технічного обслуговування та вдосконалення управлінських стратегій у сфері енергетики. Крім того, результати цього дослідження сприяли розробці більш ефективних підходів до моніторингу та діагностики трансформаторів, що дозволило значно знизити ризики відмов і поліпшити загальну надійність електричних мереж по всьому світу. Для визначення частоти відмов використовувалась формула [4]:

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^i n_i}{\sum_{i=1}^i N_i} \cdot 100\%; \quad (1)$$

де n_i – кількість трансформаторів, що вийшли з ладу в i -му році;

N_i – кількість трансформаторів в експлуатації протягом i -го року.

Згідно з рішенням робочої групи, серйозною відмовою вважалася будь-яка ситуація, що вимагала виведення трансформатора з експлуатації на період понад сім днів для проведення огляду, ремонтних робіт або заміни [5]. Цікаво, що обмотки трансформаторів стали основною причиною відмов, як для підвищувальних трансформаторів поблизу генераторів, так і для трансформаторів розміщених на підстанціях (рис. 1, 2) [4].

Згідно з отриманими результатами дослідження, було встановлено, що підвищувальні трансформатори, розташовані безпосередньо біля генераторів, демонструють значно вищий рівень відмов обмоток — 47,35%, порівняно з трансформаторами, що функціонують на підстанціях, де цей показник складає 37,69%. Це свідчить про те, що трансформатори, які працюють у безпосередній близькості до джерела енергії, схильні до більш високих навантажень, що, ймовірно, сприяє підвищеному ризику пошкодження їх обмоток через стреси, пов'язані з тривалою роботою під високими навантаженнями та підвищеними температурними режимами.

Водночас, трансформатори, що експлуатуються на підстанціях, мали вищий рівень відмов високовольтних вводів/выводів — 17,16%, порівняно з лише 8,36% для трансформаторів поблизу генераторів. Це може бути пов'язано з відмінностями в умовах роботи, де трансформатори на підстанціях часто піддаються впливу різких коливань напруги та високих навантажень при зміні режимів роботи, що призводить до більшого навантаження на високовольтні ввідні/вивідні елементи.

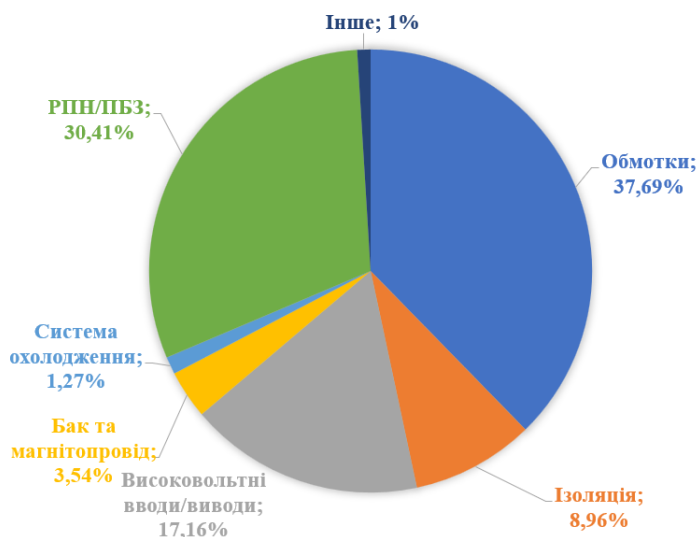


Рисунок 1 – Несправні елементи, що викликали вихід з ладу трансформаторів на підстанціях згідно [6]

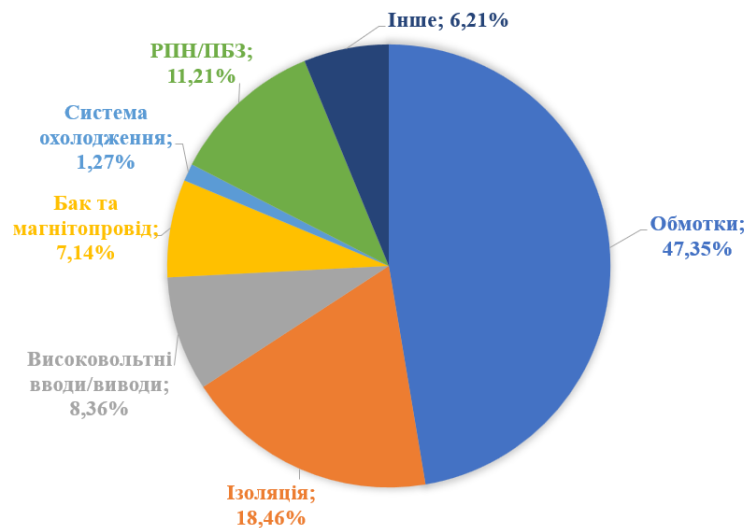


Рисунок 2 – Несправні елементи, що викликали вихід з ладу підвищувальних трансформаторів поблизу генератора згідно [6]

З іншого боку, трансформатори, розташовані на підстанціях, виявили більшу вразливість до відмов, пов'язаних із пристроєм регулювання напруги (РПН). Відсоток таких відмов становив 30,41%, що значно перевищувало показник підвищувальних трансформаторів, де цей показник складав лише 11,21%. Це може бути пов'язано з тим, що трансформатори на підстанціях зазнають більш частих змін навантаження і напруги, що значно навантажує РПН, сприяючи прискореному зношенню та пошкодженню цього важливого елементу. В той час як підвищувальні трансформатори, розташовані поблизу генераторів, менш піддані таким змінам, тому й кількість відмов РПН у них є значно меншою.

Висновки

У ході дослідження були проаналізовані статистичні дані щодо відмов силових трансформаторів, що працюють в різних умовах експлуатації, зокрема на підстанціях та поблизу генераторів. Результати показали суттєві відмінності в частоті відмов за різними критеріями, такими як обмотки, високовольтні ввідні/вивідні елементи та пристрої регулювання напруги (РПН). Трансформатори, розташовані біля генераторів, мали вищий рівень відмов обмоток через більші навантаження, але виявили меншу вразливість до відмов високовольтних ввідів/виводів. У той же час, трансформатори на підстанціях частіше зазнавали пошкоджень РПН, що, ймовірно, пов'язано з частішими змінами напруги та навантаження.

Ці результати підкреслюють важливість врахування специфічних умов експлуатації при плануванні технічного обслуговування та ремонту силових трансформаторів. Зокрема, для трансформаторів на підстанціях необхідно посилити контроль за станом РПН, а для підвищувальних трансформаторів — за обмотками та високовольтними елементами. Врахування цих факторів дозволить підвищити надійність роботи енергетичних систем, знизити ризики відмов і зменшити витрати на ремонт та обслуговування обладнання в довгостроковій перспективі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Шевченко, В. І. Методи діагностики та моніторингу технічного стану силових трансформаторів / В. І. Шевченко, О. А. Дмитриченко. – Київ: Наукова думка, 2018. – 320 с.
2. ДСТУ 3041-95. Силові трансформатори. Правила експлуатації та технічного обслуговування / Національний стандарт України. – Київ, 1995. – 58 с.
3. О. Є. Рубаненко, М. П. Лабзун, М. О. Гришук, «Визначення дефектів трансформаторного обладнання з використанням частотних діагностичних параметрів», Вісник Нац. техн. ун-ту "ХП", зб. наук. пр. Сер.: Нові рішення в сучасних технологіях, № 23, с. 41-46, 2017.
4. A. Bossi, et al., "An International Survey on Failures in Large Power Transformers in Service" – Final report of CIGRE Working Group 12.05, Electra, No.88, pp. 22 – 48, 1983.
5. Stefan Tenbohlen, Convenor, Janine Jagers, Secretary, Gilson Baston, Brendan Diggin, Michael Krüger, Piotr Manski, Bhavin Desai, Johannes Gebauer, John Lapworth, Anne McIntosh, Antun Mikulecky, Pascal Müller, Claude Rajotte, Takehisa Sakia, Shirasaka Yukiyasu. Transformer Reliability Survey: Interim Report. January 2012. Режим доступу URL: https://www.researchgate.net/publication/291292609_Transformer_reliability_survey_Interim_report

Сліденко Микола Олегович – студент, факультет електроенергетики та електромеханіки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: slidenkonick@gmail.com.

Тептя Віра Володимирівна – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електричних станцій та систем, факультет електроенергетики та електромеханіки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: teptyavira@gmail.com

Олійник Юрій Олександрович – студент, факультет електроенергетики та електромеханіки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

Mykola O. Slidenko – student of the Department of electric power stations and systems, Faculty of Power Engineering and Electromechanics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine; e-mail: slidenkonick@gmail.com.

Vira V. Teptia – Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor of the Department of Electrical Power Plants and Systems, Faculty of Electrical Power Engineering and Electromechanics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: teptyavira@gmail.com

Oliinyk Yuriy O. - student of the Department of electric power stations and systems, Faculty of Power Engineering and Electromechanics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine;

МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС СИНХРОННОГО ДВИГУНА З ЄМНІСНИМ НАКОПИЧУВАЧЕМ ЕНЕРГІЇ У КОНТУРІ ЗБУДЖЕННЯ У ФАЗНІЙ СИСТЕМІ КООРДИНАТ

¹Дніпровський державний технічний університет

Анотація: Надійна та ефективна робота синхронних двигунів (СД) є фундаментальною вимогою для ключових галузей промисловості, таких як металургія, енергетика та гірничодобувна промисловість[1]. Однак, під час пускових режимів, особливо при прямому включенні в мережу, СД зазнають значних динамічних навантажень. Ці процеси характеризуються різкими стрибками струму, що можуть у 5-7 разів перевищувати номінальні значення, та потужними електромеханічними коливаннями. Такі явища не лише негативно впливають на стабільність електромережі, але й спричиняють передчасний знос ізоляції, механічні пошкодження самого двигуна та пов'язаного обладнання, що може призводити до аварійних ситуацій та знижувати загальну надійність.

Для розв'язання цієї проблеми пропонується вдосконалений математичний опис СД, що інтегрує ємнісний накопичувач енергії у контур збудження. Модель розроблена у фазній системі координат, що дозволяє найбільш точно відобразити фізичні процеси в машині без ускладнених перетворень[2]. Для спрощення аналізу та узагальнення результатів використовується система відносних одиниць, де за базисні величини приймаються амплітуди номінальних фазних струму та напруги статора, синхронна кутова частота, а також номінальна потужність машини. Такий підхід дозволяє сформулювати узагальнену систему диференціальних рівнянь, що описують складні електромагнітні процеси в обмотках статора та ротора.

У даній роботі розглянуто послідовне підключення накопичувача до обмотки збудження (ОЗ). При такій конфігурації в рівняння балансу напруг обмотки збудження додаються члени, що враховують активний опір та, що найважливіше, інтегро-диференційну складову напруги на ємності накопичувача.

Таким чином, використання ємнісних накопичувачів енергії в контурі збудження дозволяє перетворити пуск двигуна з неконтрольованого процесу на керований перехідний режим. Це забезпечує оптимізацію перехідних процесів, суттєве зменшення пускових струмів та скорочення часу розгону. Як наслідок, досягається значне зниження енергетичних втрат, підвищення загального ККД електропривода та більш раціональне використання енергоресурсів, що є важливим кроком до підвищення надійності та ефективності потужних електричних машин.

Ключові слова: Математичне моделювання, синхронний двигун, накопичувач енергії, контур збудження, енергоефективність.

Abstract: The reliable and efficient operation of synchronous motors (SMs) is a fundamental requirement for key industries such as metallurgy, power generation, and mining. However, during startup modes, particularly with direct-on-line starting, SMs are subjected to significant dynamic loads. These processes are characterized by sharp current surges, which can be 5-7 times higher than nominal values, and powerful electromechanical oscillations. Such phenomena not only negatively impact the stability of the power grid but also cause premature insulation wear, mechanical damage to the motor and associated equipment, potentially leading to emergency situations and reducing overall reliability.

To solve this problem, an improved mathematical model of an SM is proposed, which integrates a capacitive energy storage unit into the excitation circuit. The model is developed in a phase coordinate system, which allows for the most accurate representation of the physical processes in the machine without complex transformations. To simplify the analysis and generalize the results, a per-unit system is used, where the base values are the amplitudes of the nominal stator phase current and voltage, the synchronous angular frequency, and the nominal power of the machine. This approach makes it possible to formulate a generalized system of differential equations describing the complex electromagnetic processes in the stator and rotor windings.

This paper considers the series connection of the storage unit to the excitation winding. In this configuration, terms are added to the voltage balance equation of the excitation winding that account for active resistance and, most importantly, the integro-differential component of the voltage across the capacitor.

Thus, the use of capacitive energy storage units in the excitation circuit allows the motor's startup to be transformed from an uncontrolled process into a controlled transient mode. This ensures the optimization of transient processes, a significant reduction in starting currents, and a shorter acceleration time. As a result, a significant reduction in energy losses is achieved, along with an increase in the overall efficiency of the electric drive and more rational use of energy resources.

Keywords: Mathematical modeling, synchronous motor, energy storage, excitation circuit, energy efficiency.

Надійна та ефективна робота синхронних двигунів (СД) є важливою для ключових галузей промисловості, таких як металургія, енергетика та гірничодобувна промисловість[1]. Однак, під час пускових режимів СД можуть виникати значні динамічні навантаження, різкі стрибки струму та електромагнітні коливання, що може спричинити аварійні ситуації та знижувати надійність обладнання. Для розв'язання цієї проблеми пропонується математичний опис СД, що включає ємнісний накопичувач енергії у контурі збудження, виконаний у фазній системі координат[2].

Для спрощення аналізу використовується система відносних одиниць, де за базисні величини приймаються амплітуди номінальних фазних струму та напруги статора, синхронна кутова частота, а також номінальна потужність машини. Цей підхід дозволяє сформулювати систему диференціальних рівнянь, що описують електромагнітні процеси в обмотках статора та ротора[3].

Розглянуто послідовне підключення накопичувача до обмотки збудження (ОЗ). Для послідовного з'єднання в рівняннях напруги обмотки збудження додаються члени, що враховують додатковий опір та ємність накопичувача.

Метою роботи є розробка математичного опису синхронних двигунів.

Результати дослідження

Для того щоб перейти від фізичних величин до їхніх відносних значень, виражених у частках базисних величин, потрібно насамперед однозначно визначити всю сукупність базисних величин. У сучасній теорії електричних машин більша частина базисних величин є загальноприйнятною, проте деякі з них є різними у різних авторів

Оскільки надалі користуватимемося здебільшого відносними одиницями, то їхнє позначення опустимо, а випадки використання іменованих величин обумовлюватимемо окремо.

$$\left\{ \begin{array}{l} U_A = i_A R_A + \frac{d\Psi_A}{dt}; \\ U_B = i_B R_B + \frac{d\Psi_B}{dt}; \\ U_C = i_C R_C + \frac{d\Psi_C}{dt}; \\ U_f = i_f (R_f + R_o) + \frac{1}{C_n} \int_0^t i_f dt + \frac{d\Psi_f}{dt}; \\ 0 = i_{ed} R_{ed} + \frac{d\Psi_{ed}}{dt}; \\ 0 = i_{eq} R_{qe} + \frac{d\Psi_{eq}}{dt}, \end{array} \right. \quad (1)$$

[4]

де R_o додатковий опір, C_n ємність накопичувача енергії.

На підставі рівнянь рівноваги напруг контурів(1) та механічного руху отримуємо систему (2)

Рівняння руху механічної частини двигуна буде: $M_e - M_c = J \frac{d\omega}{dt}$.

$$\left\{ \begin{array}{l} \Psi_A = X_{AA} i_A + X_{AB} i_B + X_{AC} i_C + X_{Af} i_f + X_{Ad} i_{ed} + X_{Aq} i_{eq}; \\ \Psi_B = X_{BA} i_A + X_{BB} i_B + X_{BC} i_C + X_{Bf} i_f + X_{Bd} i_{ed} + X_{Bq} i_{eq}; \\ \Psi_C = X_{CA} i_A + X_{CB} i_B + X_{CC} i_C + X_{Cf} i_f + X_{Cd} i_{ed} + X_{Cq} i_{eq}; \\ \Psi_f = X_{fA} i_A + X_{fB} i_B + X_{fC} i_C + X_{fd} i_{ed}; \\ \Psi_{ed} = X_{edA} i_A + X_{edB} i_B + X_{edC} i_C + X_{edf} i_f; \\ \Psi_{eq} = X_{eqA} i_A + X_{eqB} i_B + X_{eqC} i_C, \end{array} \right. \quad (2)$$

На підставі рівнянь (2)-можемо побудувати спрощену структурну схему СД (Рисунок 1)

У найпростішому випадку ємнісний накопичувач енергії(ЄНЕ) з'єднаний з обмоткою збудження СД послідовно через додатковий або пусковий опір. Складемо для такої схеми математичну модель СД на підставі рівнянь (2):

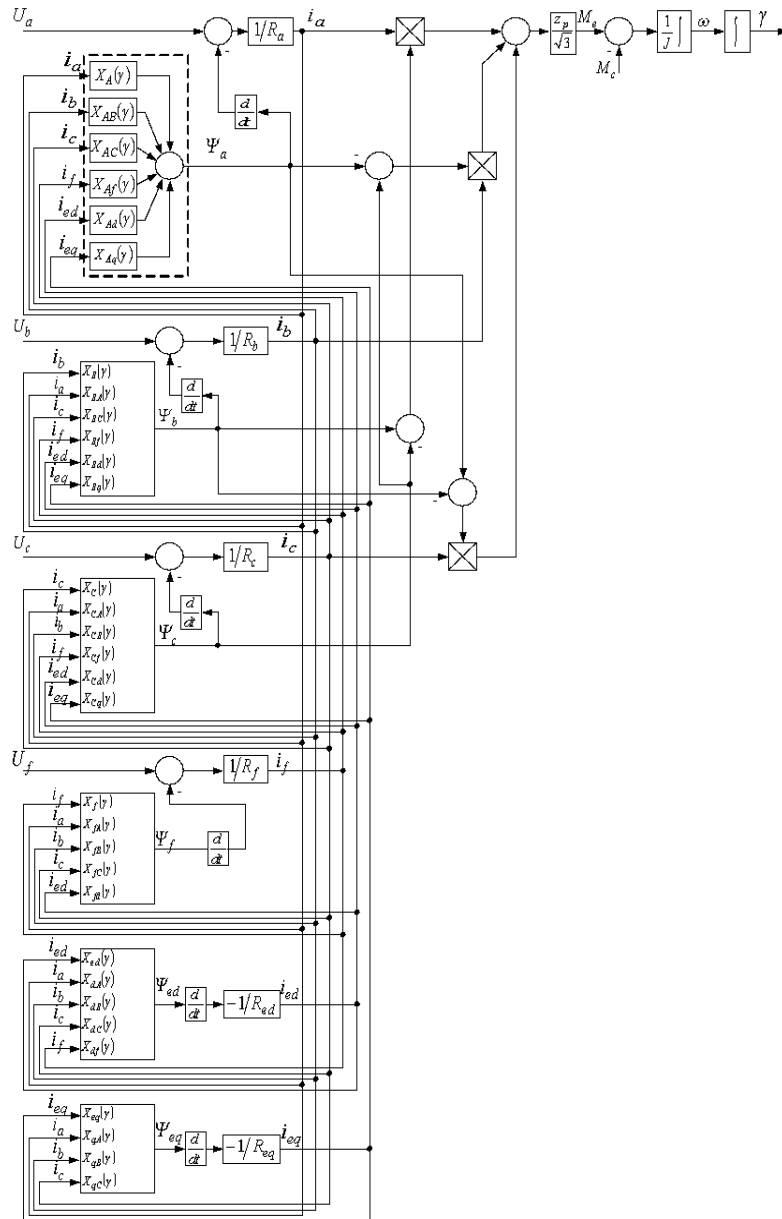


Рисунок 1 – Структурна схема СД

Запишемо вирази для потокозчеплень:

За умови, що $U_f = 0$ і напруга на паралельних гілках контуру збудження $U_{ab} = \frac{d\Psi_f}{dt} - i_{fL}R_f$ отримаємо:

де i_{fL} - струм, що протікає через обмотку збудження; i_{fCH} - струм, що протікає через ЄНЕ. Оскільки частота струму, що наводиться в обмотці збудження, дорівнює ковзання, то можемо записати, що .

$$X_{CH} = -\frac{1}{2\pi s C_H}$$

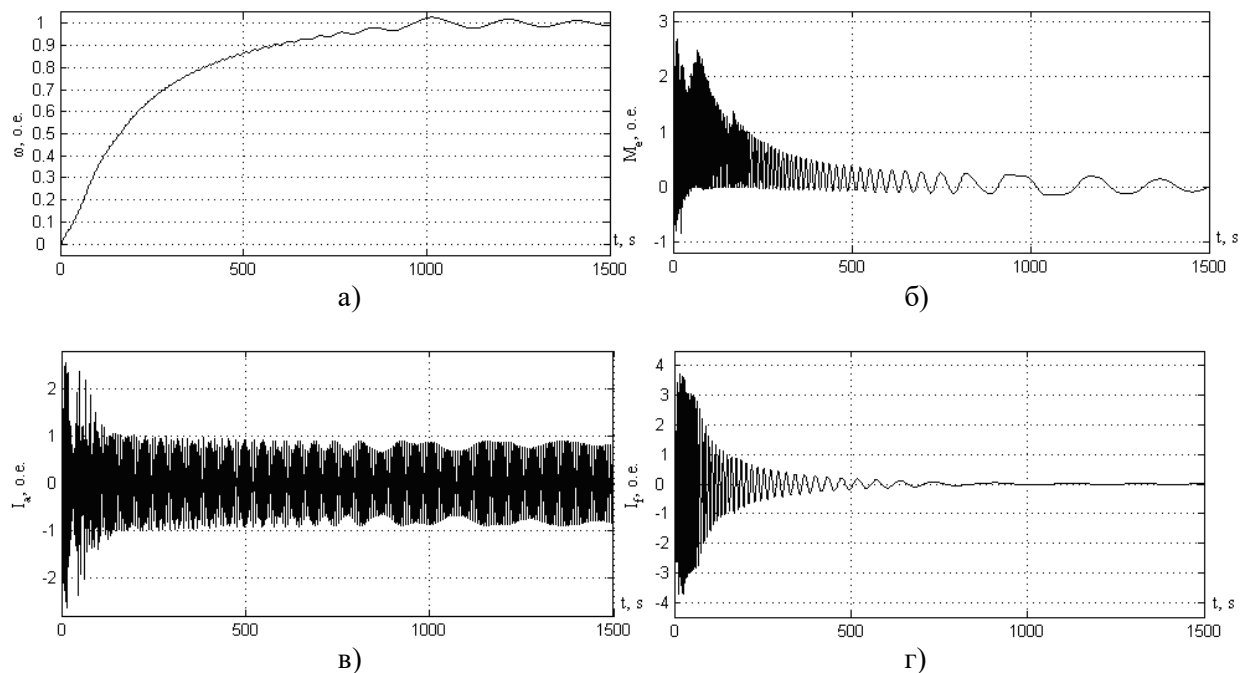


Рисунок 2 – Розрахункові пускові характеристики СД з ЄНЕ, послідовно включеним у контур збудження, при живленні від тиристорного регулятора напруги

На Рисунку 2 зображені: а)Частота обертання СД; б)Електромагнітний момент СД; в)Сила струму обмотки збудження; г)Сила струму обмотки фази А статора

Висновок

У ході виконання роботи було розроблено вдосконалений математичний опис синхронного двигуна (СД), що інтегрує ємнісний накопичувач енергії (ЄНЕ) у контур збудження. Модель побудована у фазній системі координат, що забезпечує точне відображення фізичних процесів в обмотках машини без застосування складних перетворень.

Для узагальнення результатів та спрощення аналізу використано систему відносних одиниць, де за базисні прийнято номінальні параметри машини. Сформульовано узагальнену систему диференціальних рівнянь (1), (2), яка описує складні електромагнітні та електромеханічні процеси в двигуні. Модель детально враховує послідовне підключення накопичувача до обмотки збудження, додаючи в рівняння балансу напруг інтегро-диференційну складову напруги на ємності.

Розроблений математичний опис дозволяє проводити аналіз перехідних процесів під час пуску СД, що підтверджено розрахунковими характеристиками (Рисунок 2). Модель слугує інструментальною основою для подальшої оптимізації пускових режимів, зниження динамічних навантажень та пускових струмів, і, як наслідок, підвищення загальної енергоефективності та надійності потужних електроприводів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] В. П. Грудська та В. Й. Чибеліс, Електротехнічні пристрої систем автоматичного управління технологічними процесами: навч. посіб. посібник для студентів галузі знань 15 «Автоматизація та приладобудування» спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021.
- [2] О. І. Толочко, Моделювання електромеханічних систем. Системне моделювання систем асинхронного електроприводу: навчальний посібник. Київ: НТУУ «КПІ», 2016.
- [3] С. С. Бардін, Р. В. Вожаков, and О. Л. Бондаренко, Перехідні електромеханічні процеси в електроенергетичних системах: Курсовий проект: навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024.
- [4] В. І. Мілих та інші., Дослідження синхронних машин: лаб. практикум, В. І. Мілих, . Харків: НТУ «ХПІ», 2010.

Чугунов Давид В'ячеславович, аспірант кафедри електротехніки та електромеханіки, Дніпровський державний технічний університет, Кам'янське, e-mail: davidchugunov00@gmailcom

Нізімов Віктор Борисович, доктор технічних наук, професор кафедри електротехніки та електромеханіки, Дніпровський державний технічний університет, Кам'янське, e-mail: vikbor36@gmail.com

Chugunov David V. — Post-Graduate Student of Department of Electrical Engineering and Electromechanics, Dnipro State Technical University, Kamyanske, e-mail: davidchugunov00@gmail.com

Nizimo Viktor B. — Dr. Sc., Professor of Department of Electrical Engineering and Electromechanics, Dnipro State Technical University, Kamyanske, e-mail: vikbor36@gmail.com

ДО ПИТАННЯ ПРОЕКТУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ПЕРОННОГО АВТОБУСА НА ЕЛЕКТРОТЯЗІ

Вінницький Національний Технічний Університет

Анотація: Перонні автобуси є важливою частиною аеропортової інфраструктури, що забезпечує швидке та комфортне перевезення пасажирів між терміналом і літаком. Одним із перспективних напрямів їх розвитку є перехід на електротягу. Розглянуто основні підходи до проектування електроприводу перонного автобуса на електротязі, зокрема вибір типу електродвигуна, трансмісії та тягової акумуляторної батареї. Проаналізовано ефективність використання літій-іонних акумуляторів і можливості інтеграції систем рекуперативного гальмування.

Ключові слова: перонний автобус, електропривод, акумуляторна батарея, електродвигун, рекуперація.

Abstract: Airport buses are an important part of the airport infrastructure, providing fast and comfortable transportation of passengers between the terminal and the aircraft. One of the promising areas of their development is the transition to electric traction. The main approaches to designing the electric drive of an airport bus on electric traction are considered, in particular the choice of the type of electric motor, transmission and traction battery. The efficiency of using lithium-ion batteries and the possibilities of integrating regenerative braking systems are analyzed.

Keywords: apron bus, electric drive, battery, electric motor, regeneration.

Вступ

Перонні автобуси забезпечують перевезення пасажирів на короткі відстані в межах аеропорту, що робить їх ідеальними для використання електротязі. Перехід на електропривод дозволяє зменшити викиди шкідливих речовин, покращити енергоефективність та знизити експлуатаційні витрати. В роботі розглянуто підхід до проектування електричного перонного автобуса, його ключові технічні характеристики та конструктивні рішення [1].

Метою роботи є вибір оптимальних параметрів електроприводу для створення ефективного перонного автобуса на електротязі.

Об'єктом дослідження є процес роботи тягового електроприводу перонного автобуса.

Предметом дослідження є системи та конструктивні елементи тягового електроприводу, акумуляторної батареї та системи рекуперації енергії.

Основна частина

Одним із ключових елементів електробуса є вибір електродвигуна. Аналіз існуючих рішень показує, що найефективнішими є трифазні асинхронні електродвигуни, синхронні двигуни з постійними магнітами та безколекторні електродвигуни. Асинхронні двигуни мають високий ККД (до 95%) та низькі вимоги до обслуговування, тоді як двигуни з постійними магнітами забезпечують високу питому потужність та керованість. [1-2].

Важливим елементом електротязі є акумуляторна батарея [3]. Серед можливих варіантів – свинцево-кислотні, літій-іонні та натрій-нікель-хлоридні акумулятори. Літій-іонні батареї мають високу щільність енергії, довгий термін служби та підтримують швидку зарядку, що робить їх найбільш доцільним вибором для електробуса [5].

Система рекуперації енергії дозволяє зменшити витрати енергії та підвищити автономність транспорту. Вона працює за рахунок перетворення кінетичної енергії у електричну при гальмуванні, що забезпечує додаткову зарядку акумуляторної батареї.

З точки зору конструкції, найбільш оптимальним є використання централізованого розташування електродвигуна з передачею крутного моменту через редуктор або ж безпосереднє використання мотор-колів. Останній варіант дозволяє зменшити втрати енергії та спростити конструкцію трансмісії.

На рисунку 1 представлена загальна блок-схема взаємодії основних елементів системи електропривода перонного автобуса. Вона ілюструє зв'язки між тяговою акумуляторною батареєю, електродвигуном, механічною трансмісією, системами управління та додатковими пристроями, такими як зарядний пристрій і клімат-контроль салону.



Рисунок 1 – Блок-схема взаємодії елементів електропривода перонного автобуса.

Висновки

Використання електропривода у перонних автобусах дозволяє значно знизити експлуатаційні витрати, підвищити екологічність транспорту та покращити комфорт пасажирів. Найбільш перспективним є застосування літій-іонних

акумуляторів, мотор-колів та системи рекуперативного гальмування. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на оптимізацію енергоспоживання та впровадження ефективних систем керування електроприводом.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Тімков, О. М., Гладченко, В. С., & Гордієнко, М. М. (2019). Методика розробки математичної моделі електромобіля відповідно до його компоувальної схеми. Технічна інженерія, (2(84), с. 10-15. [https://doi.org/10.26642/ten-20192\(84\)-10-15](https://doi.org/10.26642/ten-20192(84)-10-15)
2. M. Ehsani, Modern Electric, Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory and Design, CRC Press, 2018.
3. Бондаренко В.І. Основи електричного привода: навчальний посібник / В.І. Бондаренко, Ю.О. Крисан. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2012 – 402 с
4. Бойко С. М., Жуков О. А., Лапіна О. С. Свідectво про реєстрацію авторського права на твір № 132096 UA.Науковий твір «Концепція проектування перонного автобуса на електротязі для регіонального аеропорту». Державна організація «Український національний офіс інтелектуальної власності та інновацій». Дата реєстрації 16 грудня 2024 р.
5. Енергетичні ресурси транспортних засобів. Навчальний посібник / С.М. Бойко, І.В. Касаткіна, О.А. Жуков, А.В. Реута, О. С. Лапіна – Варшава: iScience Sp. z.o.o. – 2024 – 319 с.

Фаренюк Артем Миколайович – студент групи ЕПА-25м, факультет електроенергетики та електромеханіки, Вінницький національний технічний університет, ел. пошта: artemfarenu03@gmail.com

Жуков Олексій Анатолійович – канд. техн. наук, доцент кафедри комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів, Вінницький національний технічний університет, ел. пошта: alex4444_2004@ukr.net

Fareniuk Artem M. - student of group EPA-25m, Faculty of Electrical Power Engineering and Electromechanics, Vinnytsia National Technical University, e- mail: artemfarenu03@gmail.com

Zhukov Oleksii A. – Cand. Sci (Tech.), Associate Professor, Department of Computerized Electromechanical Systems and Complexes, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: alex4444_2004@ukr.net

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА АВТОНОМНОГО ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ

Вінницький національний технічний університет

Анотація: У даній роботі розглянуто та модернізовано електропривод електромобіля, що забезпечує плавний пуск, точне регулювання швидкості руху, електричне та рекупераційне гальмування. Досліджено вплив елементної бази, структури системи керування, методів рекуперації та алгоритмів оптимізації режимів роботи. Проведено розрахунок і вибір приводного двигуна, розроблено систему керування. Виконано розрахунки статичних і динамічних характеристик. Результати розрахунків показали, що розроблена система керування повністю відповідає поставленим задачам. Запропоноване рішення є більш економічним та надійним у роботі. Розроблено електричні структурну і функціональну схеми, а також виконано розрахунки і вибір елементів їх силових частин. Визначено основні положення щодо охорони праці та безпечної експлуатації електроприводу.

Ключові слова: електропривод електромобіля, плавний пуск, регулювання швидкості, приводний двигун.

Abstract: This paper examines and modernizes the electric drive of an electric vehicle, which provides smooth start-up, precise speed control, electric and regenerative braking. The influence of the element base, control system structure, recuperation methods, and algorithms for optimizing operating modes is investigated. The calculation and selection of the drive motor were carried out, the control system was developed. Calculations of static and dynamic characteristics were performed. The results of the calculations showed that the developed control system fully meets the tasks. The proposed solution is more economical and reliable in operation. Electrical structural and functional diagrams were developed, and calculations and selection of elements of their power parts were also performed. The main provisions on labor protection and safe operation of the electric drive were determined.

Keywords: electric drive of an electric vehicle, smooth start, speed control, drive motor, control system.

Вступ

Сучасні автономні транспортні засоби (АТЗ) є складними електромеханічними системами, ефективність роботи яких безпосередньо залежить від рівня енергоспоживання. Зменшення втрат енергії у силовій частині електропривода, оптимізація керування рухом та впровадження систем рекуперації гальмівної енергії є ключовими завданнями підвищення ефективності. Для цього необхідно вдосконалити не лише електромеханічну частину, а й програмне забезпечення мікроконтролера, що керує процесами у реальному часі.

Основна частина

У даній роботі проведено моделювання тягового електропривода з використанням двигуна постійних магнітів (PMSM) та мікроконтролера MSP430. Розроблена система керування забезпечує плавний пуск, стабілізацію швидкості та ефективну рекуперацію енергії при гальмуванні. Завдяки реалізації алгоритмів оптимального керування досягнуто підвищення ККД на 12–18% порівняно зі стандартними системами.

Мікроконтролер MSP430 дозволяє реалізувати імпульсно-широтну модуляцію (PWM), вимірювання струму, температури та швидкості обертання, що забезпечує адаптивне регулювання навантаження. Досліджено вплив зміни частоти імпульсів та алгоритмів зворотного зв'язку на енергоспоживання системи. Розроблено методику визначення оптимального режиму роботи, що дозволяє мінімізувати втрати у двигуні та перетворювачі.



Рисунок 1 – Зовнішній вигляд мікроконтролера MSP430

Крім того, проведено аналіз теплових режимів електродвигуна . Виконано техніко-економічне порівняння з аналогічними системами, що підтвердило доцільність застосування запропонованого підходу в автономних електротранспортних засобах.

Висновок

Розроблено структуру та алгоритм роботи тягового електропривода автономного транспортного засобу з використанням мікроконтролера MSP430. Було виконано перевірку вибраного електродвигуна на відповідність умовам перевантаження. Оптимізовано процес керування двигуном постійних магнітів, що дозволило знизити втрати енергії у перехідних режимах. Запропоновано методику рекуперації енергії з підвищенням ККД електропривода. Здійснено порівняльний аналіз систем керування тяговим електроприводом транспортного засобу з метою визначення найбільш ефективної конфігурації. Проведено техніко-економічне обґрунтування ефективності системи, що підтвердило її доцільність для використання в електромобілях нового покоління.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Лежнюк П.Д., Кулик В.В., Нетребський В.В. Принцип найменшої дії в електроенергетиці. – Вінниця: ВНТУ, 2014.
2. Texas Instruments. MSP430 Family User Guide, 2024.
3. Рубаненко О.Є., Добровольська Л.Н. Енергоефективні електроприводи з рекуперацією енергії. – Вісник ВНТУ, 2022.
4. Wang Z., Luo Y., Wu W. Optimization of traction drive control for electric vehicles. – IEEE Transactions on Energy Conversion, 2024.

Фаренюк Артем Миколайович – студент групи ЕПА-25м, факультет електроенергетики та електромеханіки, Вінницький національний технічний університет, ел. пошта: artemfarenu03@gmail.com

Жуков Олексій Анатолійович – канд. техн. наук, доцент кафедри комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів, Вінницький національний технічний університет, ел. пошта: alex4444_2004@ukr.net

Fareniuk Artem M. - student of group EPA-25m, Faculty of Electrical Power Engineering and Electromechanics, Vinnytsia National Technical University, e- mail: artemfarenu03@gmail.com

Zhukov Oleksii A. – Cand. Sci (Tech.), Associate Professor, Department of Computerized Electromechanical Systems and Complexes, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: alex4444_2004@ukr.net

АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ СПОСОБІВ ПЕРЕДПОСІВНОЇ ОБРОБКИ НАСІННЯ

¹ Сумський національний аграрний університет

Анотація

Вирішення проблеми підвищення врожайності шляхом застосування електрофізичних способів стимуляції біохімічних процесів посівного матеріалу. Проведений аналіз переваг та недоліків методів передпосівної обробки насіння. В результаті якого було встановлено найбільш ефективним методом передпосівної обробки насіння є застосування електромагнітного поля.

Ключові слова: електромагнітне поле, стимуляція, струм, розряд, вплив, енергія, ефективність.

Abstract

The problem of increasing crop yield was addressed by applying electrophysical methods to stimulate the biochemical processes of the seeds. An analysis of the advantages and disadvantages of seed pre-sowing treatment methods was conducted. As a result, the most effective method of pre-sowing seed treatment was determined to be the application of a magnetic field.

Keywords: electromagnetic field, stimulation, current, discharge, impact, energy, efficiency.

Вступ

Проблема підвищення врожайності та забезпечення стабільного розвитку рослинних культур зумовлює необхідність пошуку ефективних і водночас екологічно безпечних методів передпосівної обробки насіння. Серед різних підходів, що застосовуються в аграрному виробництві, особливий інтерес становлять електрофізичні способи впливу, які базуються на використанні енергії електричних, магнітних чи комбінованих полів для стимуляції фізіолого-біохімічних процесів у насінні.

Метою роботи є аналіз електрофізичних методів обробки посівного матеріалу.

Результати дослідження

Одним із таких методів є обробка насіння електричним струмом, що сприяє активації обмінних процесів та підвищенню енергії проростання. Перевагою цього методу є його відносна простота та доступність. Водночас суттєвим недоліком є нерівномірність впливу та небезпека перегрівання насіннєвого матеріалу, що може призводити до зниження схожості.

Іншим підходом виступає застосування коронного розряду, який поєднує знезаражувальний ефект із стимуляцією початкових фаз росту. Цей метод забезпечує зниження інфекційного навантаження та підвищує стійкість проростків. Проте надмірна інтенсивність коронного розряду може викликати пошкодження оболонки насіння, що обмежує його використання.

Перспективним напрямом вважається також використання ультразвуку, який стимулює проникність клітинних мембран, активує ферментативні системи й інтенсифікує процеси проростання. Разом з тим занадто висока інтенсивність ультразвукових коливань здатна спричинити механічні пошкодження зародка та втрату посівних якостей.

Найбільш інноваційним і водночас універсальним способом передпосівної обробки є вплив електромагнітного поля. Цей метод забезпечує рівномірність дії, оскільки енергія поля передається насінню безконтактно, що усуває ризик механічних пошкоджень. Додатковою перевагою є можливість тонкого регулювання параметрів електромагнітного впливу залежно від культури та фізіологічного стану насіння. Завдяки цьому досягається підвищення енергії проростання, зменшення стресостійкості на початкових етапах росту та збільшення врожайності в цілому. На відміну від інших методів, дія електромагнітного поля характеризується енергоощадністю та екологічною безпечністю, що особливо важливо в умовах сучасного сталого землеробства.

Висновки

Таким чином, проведений аналіз показує, що хоча всі електрофізичні методи обробки насіння мають свої переваги та певні обмеження, найбільш перспективним напрямом розвитку технологій залишається застосування електромагнітного поля. Воно дозволяє поєднати ефективність стимуляції біологічних процесів з безпечністю та стабільністю отриманого ефекту, що робить цей метод важливим інструментом підвищення продуктивності сільськогосподарського виробництва.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Соловей І. Обробка насіння зернових культур у високочастотних електричних полях. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки. 2019. Т. м30 (69) Ч. 1 № 5. С. 12–16.
2. Захаров Д. О., Бясов С. Є. Електрофізичні методи обробки сільськогосподарської продукції. Миколаїв. 2017. С. 18.
3. Гайдукевич С. В., Семенова Н. П. Аналіз ефективності електрофізичних методів обробки насіння томатів. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства, Вип. 203 «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». 2019. С. 76-79.

Юрченко Олександр Юрійович — PhD, доцент, завідувач кафедри енергетики та електротехнічних систем, інженерно-технологічний факультет, Сумський національний аграрний університет, Суми, e-mail: aleksyurchenko110917@gmail.com

Сіренко Юлія Володимирівна — PhD, доцент кафедри енергетики та електротехнічних систем, інженерно-технологічний факультет, Сумський національний аграрний університет, Суми, e-mail: sirenko.ula2018@gmail.com

Мукоріз Артем Ігорович — здобувач групи ETEC 2401m, інженерно-технологічний факультет, Сумський національний аграрний університет, Суми, e-mail: mukoreztema@gmail.com

Науковий керівник: **Юрченко Олександр Юрійович** — PhD, доцент, завідувач кафедри енергетики та електротехнічних систем, інженерно-технологічний факультет, Сумський національний аграрний університет, м. Суми

Yurchenko Oleksandr Y. — PhD, Associate Professor, Head of the Department of Energy and Electrical Systems, Faculty of Engineering and Technology, Sumy National Agrarian University, Sumy, e-mail: aleksyurchenko110917@gmail.com

Sirenko Yuliya V. — PhD, Associate Professor of the Department of Energy and Electrical Systems, Faculty of Engineering and Technology, Sumy National Agrarian University, Sumy, e-mail: sirenko.ula2018@gmail.com

Mukorez Artem I. — applicant of group ETEC 2401m, Faculty of Engineering and Technology, Sumy National Agrarian University, Sumy, e-mail: mukoreztema@gmail.com

Supervisor: **Yurchenko Oleksandr Y.** — PhD, Associate Professor, Head of the Department of Energy and Electrical Systems, Faculty of Engineering and Technology, Sumy National Agrarian University, Sumy

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ВПЛИВУ ІМПУЛЬСНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ НА НАСІННЯ ОЗИМОЇ ПШЕНИЦІ

¹ Сумський національний аграрний університет

Анотація

Проведений аналіз досліджень обробки посівного матеріалу імпульсним електричним полем, його переваги та недоліки, вплив на характеристики насіння озимої пшениці. Результати впровадження імпульсного електричного поля у технології передпосівної обробки насіння.

Ключові слова: електричне поле, імпульс, струм, розряд, вплив, енергія, ефективність.

Abstract

An analysis of research on the treatment of seed material with a pulsed electric field, its advantages and disadvantages, and its impact on the characteristics of winter wheat seeds was conducted. Results of the introduction of a pulsed electric field in the technology of pre-sowing seed treatment.

Keywords: electric field, impulse, current, discharge, impact, energy, efficiency.

Вступ

Якість посівного матеріалу є фундаментальним фактором, що визначає ефективність рослинництва та майбутній урожай зернових культур. Однією з основних проблем у цій сфері є не лише забезпечення високої схожості та енергії проростання насіння, але й контроль патогенної мікрофлори, яка може значно знижувати якість продукції та стійкість рослин до хвороб. Традиційні методи підготовки насіння, такі як хімічне протруювання, хоча й ефективні, мають суттєві обмеження: вони пов'язані з високими витратами, негативним впливом на навколишнє середовище та можливим зниженням біологічної активності насіння. У зв'язку з цим актуальним стає розвиток електрофізичних технологій, що дозволяють комплексно впливати на насіння без використання хімікатів, підвищуючи його біологічну активність і одночасно знезаражуючи його від патогенів.

Метою роботи є підвищення ефективності проростання насіннєвого матеріалу шляхом електрофізичної обробки.

Результати дослідження

Особливої уваги заслуговує метод обробки насіння імпульсним електричним полем (ІЕП). Дослідження показали, що застосування ІЕП у раціональних режимах дозволяє значно покращити фізіологічні характеристики насіння озимої пшениці. Так, експериментальні результати свідчать про підвищення енергії проростання до 32%, схожості – до 3%, а маси проростків – до 34% порівняно з контрольними зразками. Важливим є те, що крім стимулюючого ефекту, ІЕП надає сильний знезаражуючий вплив: заселеність насіння патогенною мікрофлорою зменшувалася на 70–90%.

Впровадження ІЕП у технології передпосівної обробки насіння поєднує стимулюючий та дезінфікуючий ефекти без використання шкідливих хімічних речовин. Це дозволяє не лише підвищити продуктивність насіння, а й зберегти екологічну рівновагу ґрунтового середовища та біорізноманіття. Техніко-економічний аналіз підтвердив доцільність застосування розробленої установки на виробництві, оскільки вона забезпечує підвищення ефективності обробки насіння, зменшення витрат на традиційні протруйники та підвищення загальної рентабельності вирощування озимої пшениці.

Висновки

Результати досліджень свідчать про високу перспективність використання імпульсного електричного поля як інноваційного методу передпосівної обробки насіння. Впровадження даної технології дозволяє підвищити енергію проростання та схожість насіння, знизити патогенне навантаження, покращити якість проростків та сприяє економічній ефективності виробництва. Це

відкриває нові можливості для розвитку сучасних агротехнологій, спрямованих на підвищення продуктивності та сталості зернового господарства. Результати свідчать про те, що ІЕП може стати універсальним інструментом для комплексного підходу до підготовки насіння озимої пшениці, забезпечуючи одночасно біологічний, екологічний та економічний ефект.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Соловей І. Обробка насіння зернових культур у високочастотних електричних полях. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки. 2019. Т. м30 (69) Ч. 1 № 5. С. 12–16.
2. Захаров Д. О., Бясов С. Є. Електрофізичні методи обробки сільськогосподарської продукції. Миколаїв. 2017. С. 18.
3. Гайдукевич С. В., Семенова Н. П. Аналіз ефективності електрофізичних методів обробки насіння томатів. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства, Вип. 203 «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». 2019. С. 76-79.

Юрченко Олександр Юрійович — PhD, доцент, завідувач кафедри енергетики та електротехнічних систем, інженерно-технологічний факультет, Сумський національний аграрний університет, Суми, e-mail: aleksyurchenko110917@gmail.com

Сіренко Юлія Володимирівна — PhD, доцент кафедри енергетики та електротехнічних систем, інженерно-технологічний факультет, Сумський національний аграрний університет, Суми, e-mail: sirenko.ula2018@gmail.com

Мукоріз Артем Ігорович — здобувач групи ETEC 2401m, інженерно-технологічний факультет, Сумський національний аграрний університет, Суми, e-mail: mukoreztema@gmail.com

Науковий керівник: **Юрченко Олександр Юрійович** — PhD, доцент, завідувач кафедри енергетики та електротехнічних систем, інженерно-технологічний факультет, Сумський національний аграрний університет, м. Суми

Yurchenko Oleksandr Y. — PhD, Associate Professor, Head of the Department of Energy and Electrical Systems, Faculty of Engineering and Technology, Sumy National Agrarian University, Sumy, e-mail: aleksyurchenko110917@gmail.com

Sirenko Yuliya V. — PhD, Associate Professor of the Department of Energy and Electrical Systems, Faculty of Engineering and Technology, Sumy National Agrarian University, Sumy, e-mail: sirenko.ula2018@gmail.com

Mukorez Artem I. — applicant of group ETEC 2401m, Faculty of Engineering and Technology, Sumy National Agrarian University, Sumy, e-mail: mukoreztema@gmail.com

Supervisor: **Yurchenko Oleksandr Y.** — PhD, Associate Professor, Head of the Department of Energy and Electrical Systems, Faculty of Engineering and Technology, Sumy National Agrarian University, Sumy

СЕКЦІЯ 3

ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ Й ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

УДК 621.315.22:519.21

Г. В. Омеляненко¹

А. О. Макаров¹

СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ ПРОВОДІВ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ 10 кВ

¹Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» (НТУ «ХПІ»), м. Харків, Україна

Статистичний аналіз параметрів проводів повітряних ліній (ПЛ) 10 кВ було виконано для електричних мереж (ЕМ) Східної частини України за умови появи щільності струму на ділянці лінії як випадкової величини. Отримані результати оформлено у вигляді статистичного ряду та представлено в табл. 1.

Таблиця 1 – Рейтинг статистичного аналізу ПЛ 10 кВ

I_i	0÷0,1	0,1÷0,2	0,2÷0,3	0,3÷0,4	0,4÷0,5	0,5÷0,6
m_i	5	24	18	23	21	11
P_i^*	0,038	0,180	0,140	0,170	0,155	0,080
I_i	0,6÷0,7	0,7÷0,8	0,8÷0,9	0,9÷1,0	1,0÷1,1	1,1÷1,2
m_i	8	11	6	3	2	1
P_i^*	0,060	0,083	0,045	0,023	0,015	0,007

В табл. 1 показано I_i - інтервал значень щільності струму; m_i - число спостережень в даному інтервалі; P_i^* - відповідна частота появи.

Логарифмічно нормальний розподіл визначається двома параметрами: j_0 та δ_z . Величина $\lg j_0$ являється математичним очікуванням випадкової величини $Z = \lg I$, а δ_z її середньоквадратичним відхиленням [1].

Знаючи параметри розподілу, визначається ймовірність влучення випадкової величини P_i на ділянці від α до β за виразом [1]:

$$P_i(\alpha < j < \beta) = \Phi\left(\frac{\beta - \tilde{m}}{\delta}\right) - \Phi\left(\frac{\alpha - \tilde{m}}{\delta}\right) \quad (1)$$

де $\tilde{m} = \lg j_0 = -0,482$ - математичне очікування випадкової величини P_i ;

$\delta = \delta_z = -0,2881$ - середньоквадратичне відхилення випадкової величини P_i ;

$\beta = \lg j_{i+1}$; $\alpha = \lg j_i$ - межі ділянки влучання випадкової величини P_i ;

j_i - граничне значення щільності струму по інтервалам.

Результати розрахунку за (1) представлено у табл. 2.

Таблиця 2 - Результати статистичного аналізу ПЛ 10 кВ

I_i	0÷0,1	0,1÷0,2	0,2÷0,3	0,3÷0,4	0,4÷0,5	0,5÷0,6
P_i	0,037	0,186	0,145	0,165	0,154	0,080
I_i	0,6÷0,7	0,7÷0,8	0,8÷0,9	0,9÷1,0	1,0÷1,1	1,1÷1,2
P_i	0,076	0,075	0,041	0,022	0,018	0,009

Для перевірки гіпотези використано критерій Пірсона (χ) [1]:

$$\chi^2 = N \sum_{i=1}^k \frac{(P_i - P_i^*)^2}{P_i} \quad (2)$$

де χ^2 - критерій Пірсона; P_i - ймовірність потрапляння випадкової величини на інтервалі; P_i^* - відповідна частота появи випадкової величини; N - сукупність випадкових чисел; k - число інтервалів.

Використовуючи (2) було виявлено, що ця гіпотеза не суперечить реальним даним представленим у табл. 1. Тому, що оцінка математичного очікування щільності струму дорівнює $\lg j_0 = -0,486$.

Виходячи з нормального закону розподілу [1] визначено інтервал значень щільності струму, який виявився достатньо великим - (0,1÷1,2) А/мм² і будь-яке значення в ньому буде економічно доцільним, що свідомо не вірно. Тому пропонується вважати отримане значення за інтервал економічної стійкості недоцільним. Оскільки значення інтервалу вийшло в результаті неодноразовості початку експлуатації мереж то, щоб за оптимальний параметр приймати економічну щільність струму, значення її має бути витримано по всіх ділянках мережі, що практично неможливо через дискретність параметричного ряду перерізів проводів, а також через зміну навантаження від ділянки до ділянки.

Висновок

За результатами проведеного статистичного аналізу параметрів проводів слідує, що для вибору економічно доцільних значень параметрів ПЛ 10 кВ має сенс враховувати дискретність параметричного ряду перерізів проводів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1]. Огірко О.І., Галайко Н.В. Теорія ймовірностей та математична статистика: навч. посіб. – Львів: Львівський державний університет внутрішніх справ, 2017. –292 с.

Омеляненко Галина Вікторівна - кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри передачі електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3276-5476>; e-mail: omeljanenkagalina@gmail.com

Макаров Антон Олександрович – аспірант кафедри передачі електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-6181-3822>; e-mail: ant.makarov1997@gmail.com

Omelyanenko Galina Viktorivna - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Electrical Power Transmission, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3276-5476>; e-mail: omeljanenkagalina@gmail.com

Makarov Anton Oleksandrovych - Postgraduate Student of the Department of Electrical Power Transmission, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-6181-3822>; e-mail: ant.makarov1997@gmail.com

СХЕМА ЕЛЕКТРОННОГО ТАЙМЕРА ІЗ ЗАТРИМКОЮ ВВІМКНЕННЯ РЕЛЕ НА БАЗІ NE555 З ОПТОІЗОЛЯЦІЄЮ ВИХОДУ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Розроблено та досліджено експериментальну схему затримки ввімкнення реле на основі таймера NE555, оптрону PC817 та силового транзистора 2N2222. Схема працює від однополярного джерела живлення +12 В. Час затримки задається RC-ланцюгом на вході RESET NE555. В роботі наведено принцип дії, розрахунки часової константи, розрахунки струмових режимів світлодіодної та силової частин, аналіз практичних відхилень від теоретичних значень, визначені джерела помилок та запропоновано конкретні технічні рекомендації щодо підвищення надійності й повторюваності робочих характеристик.

Ключові слова: NE555, PC817, 2N2222, реле.

Abstract

An experimental relay turn-on delay circuit based on the NE555 timer, PC817 optocoupler and 2N2222 power transistor has been developed and investigated. The circuit operates from a +12 V unipolar power supply. The delay time is set by an RC circuit at the RESET input of the NE555. The paper presents the principle of operation, calculations of the time constant, calculations of the current modes of the LED and power parts, analysis of practical deviations from theoretical values, identified sources of errors and proposed specific technical recommendations for increasing the reliability and repeatability of operating characteristics.

Keywords: NE555, PC817, 2N2222, relay.

Вступ

Мета роботи — створити простий та надійний пристрій затримки ввімкнення реле для застосувань, де потрібно відтермінувати комутацію навантаження після подачі живлення або після процесу зарядження високовольтних накопичувальних конденсаторів. Обрана топологія забезпечує гальванічну розв'язку вихідного ключа через оптрон та мінімізує вплив перехідних процесів іншої частини системи на вузол керування. Практичним завданням була й верифікація математичної моделі заряду R - C та її відповідності вимірюваним часам для реальних компонентів, а також оцінка наскільки існуюча оптоелектронна ланка забезпечує необхідний базовий струм для транзисторного ключа.

Опис схеми й принцип дії

Схема складається з наступних функціональних блоків:

1. Живлення: +12 В та GND. NE555 [1] живиться між pin 8 (U_{CC}) та pin 1 (GND).
2. Часозадаючий ланцюг: змінний резистор R_{var} (використовується 0,1...1,1 МОм у випробуваннях) між +12 В і RESET (pin 4). Конденсатор C (випробовуваний 500 мкФ) між RESET і GND формує RC-ланцюг. Поки $U_{RESET} < 0,7$ В, NE555 утримується в стані скидання і вихід OUT (pin 3) LOW. Після досягнення порога, NE555 перетворюється у стан дозволу і вихід переходить до HIGH.
3. Вихідна оптоізоляція: OUT → послідовний резистор 1 кОм → світлодіод оптрона PC817 [2] (анод-катод). Фототранзистор PC817 забезпечує електричне роз'єднання між цифровою і силовою частинами (рис. 1).

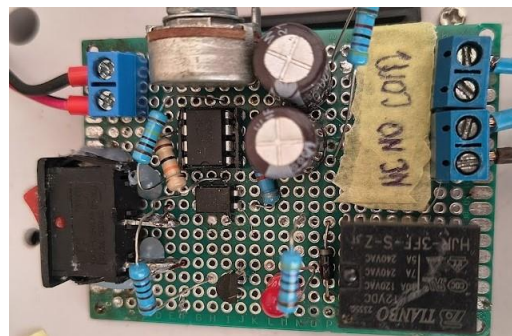
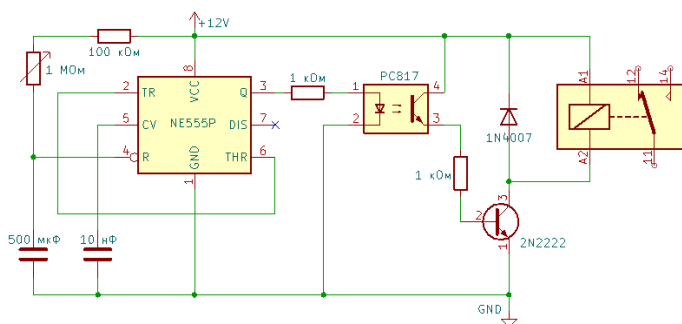


Рис. 1. Принципова схема реле часу на таймері NE555

4. Силовий ключ і реле: фототранзистор PC817 керує ланцюгом бази 2N2222 [3] через резистор 1 кОм; 2N2222 комутує котушку реле Y3F-SS-112DM [4] (котушка 12 В, $P_{coil} \approx 0,36$ Вт). Паралельно котушці встановлено діод 1N4007 для захисту від ЕРС.

Результати дослідження

Закон заряду конденсатора при заряді від джерела U_{CC} (початкова напруга $U_i = 0$):

$$U_{C,RESET} = U_{CC} \cdot (1 - e^{-t_{RESET}/RC}). \quad (1)$$

Умовою формування високого рівня на виході NE555 прийнято момент t_{RESET} , при якому $U_C(t_{RESET}) = U_{C,RESET} = 0,7$ В. Одночасно напруга на резисторі в момент t_{RESET} $U_R(t_{RESET}) = U_{CC} - U_C(t_{RESET}) = 11,3$ В. Відкриваючи відносно $RESET$, отримуємо загальну формулу:

$$t_{RESET} = -RC \cdot \ln\left(1 - \frac{U_{C,RESET}}{U_{CC}}\right) = -\tau \cdot \ln\left(1 - \frac{U_{C,RESET}}{U_{CC}}\right). \quad (2)$$

Підставимо у формулу часу

$$t_{RESET} \approx -0,1 \cdot 10^6 \cdot 500 \cdot 10^{-6} \cdot \ln\left(1 - \frac{0,7}{12}\right) \approx 50 \cdot 0,062 \approx 3,1 \text{ с}$$

$$t_{RESET} \approx -1,1 \cdot 10^6 \cdot 500 \cdot 10^{-6} \cdot \ln\left(1 - \frac{0,7}{12}\right) \approx 550 \cdot 0,062 \approx 34,1 \text{ с}$$

Отже, при заданих номіналах аналітично отримано діапазон задання часу спрацювання реле від $t_{RESET} \approx 3,1$ до $t_{RESET} \approx 34,1$ с. Цей результат узгоджується з експериментально вимірним часом формування високого рівня 33 с.

Для знаходження R і C при заданому t_{RESET} можна описати формулами:

$$R = \frac{t_{RESET}}{C \cdot (-\ln(1 - U_{C,RESET}/U_{CC}))}; \quad C = \frac{t_{RESET}}{R \cdot (-\ln(1 - U_{C,RESET}/U_{CC}))}. \quad (3)$$

Початковий зарядний струм (момент $t=0$):

$$I_0 = U_{CC}/R_{var} = 1,09 \cdot 10^{-5} \approx 10,9 \text{ мкА}. \quad (4)$$

Потужність на резисторі у стаціонарному стані під час постійного підключення:

$$P_R = \frac{U_{CC}^2}{R_{var}} = \frac{144}{1,1 \cdot 10^6} = 1,31 \cdot 10^{-4} = 131 \text{ мкВт}. \quad (5)$$

Енергія, накопичена в конденсаторі при $U_C = 0,7$ В:

$$E = \frac{1}{2} \cdot CU^2 = \frac{1}{2} \cdot 0,0005 \cdot (0,7)^2 = 0,0001225 = 122,5 \text{ мкДж}. \quad (6)$$

Вихід таймера (pin 3) через $R_{LED} = 1$ кОм подає струм на світловипромінюючий діод оптопари. Припущення і номінали: $U_{out}^{HIGH} \approx U_{CC} = 12$ В (реально — трохи менше, але для консервативних розрахунків приймаємо 12 В). Напруга падіння світлодіода оптопари $U_F \approx 1,2$ В (типова).

Струм через світлодіод:

$$I_{LED} = \frac{U_{out}^{HIGH} - U_F}{R_{LED}} = \frac{12 - 1,2}{1000} = 10,8 \text{ мА}. \quad (7)$$

Потужність на R_{LED} :

$$P_{LED} = I_{LED}^2 \cdot R_{LED} = (10,8 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 1000 \approx 0,117 \text{ Вт}. \quad (8)$$

Схема забезпечує, що при світінні LED фототранзистор оптопари і через колекторний резистор $R_{B2} = 1$ кОм формується падіння напруги, відкриваючи базу 2N2222. Для оцінки максимального струму бази при насиченні припускаємо, що оптрон, при яскравому освітленні наближається до режиму насичення й спричиняє мале падіння напруги на колектор-емітерному переході (припустимо $\ll 1$ В). Тоді напруга на резисторі бази приблизно $12 - 0,7 \approx 11,3$ В. Струм бази 2N2222: $I_B \approx 12 - 0,7 / 1000 = 11,3$ мА.

За практичним допущенням для насичення силового ключа приймаємо коефіцієнт примусового насичення $\beta_{sat} \approx 10$ (значення, що гарантує насичення в умовах комутації реле). Тоді допустимий струм колектора:

$$I_C \leq \beta_{sat} \cdot I_B = 10 \cdot 11,3 \text{ мА} = 113 \text{ мА}. \quad (9)$$

Отже, 2N2222 при запропонованих параметрах може надійно вмикати реле з номінальним струмом обмотки до 110 мА. Типові 12-вольтові реле мають струм обмотки в діапазоні від 30 до 100 мА; отже, більшість малогабаритних реле сумісні з даною схемою. Якщо вимога до струму більша, необхідно застосувати транзистор з вищим максимально допустимим струмом колектора або *MOSFET* як ключ.

Потужність, що розсіюється на колекторі 2N2222 в режимі насичення (приблизно $U_{CE,sat} \approx 0,2$ В):

$$P_{2N2222} = U_{CE,sat} \cdot I_C \leq 0,2 \cdot 0,113 \approx 0,0226 \text{ Вт} . \quad (10)$$

Для швидкого розмикання обмотки замість 1N4007 можна застосувати діод Шоткі або пасивну RC-ланку, якщо затримка розмикання критична.

Висновки

Реалізована схема затримки ввімкнення реле на базі NE555, PC817 і 2N2222 продемонструвала відповідність теоретичним розрахункам часової константи при коректних номіналах компонентів та відсутності паразитних витоків.

Аномалії в часі ввімкнення при незмінних номіналах R і C найчастіше зумовлені реальними відхиленнями фактичної ємності електролітичного конденсатора і/або паразитними витоками; їх усунення — пріоритетна діагностична дія.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Texas Instruments, “NE555 – Precision Timers. Datasheet,” Texas Instruments, [Online]. Available: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ne555.pdf>. [Accessed: Sep. 04, 2025].
- [2] Sharp Corporation, “PC817 – Photocoupler. Datasheet,” Sharp Corp., [Online]. Available: <https://www.sharpsde.com/fileadmin/products/opto/pc817.pdf>. [Accessed: Jan. 15, 2018].
- [3] ON Semiconductor, “2N2222A – NPN Amplifier Transistor. Datasheet,” ON Semiconductor, [Online]. Available: <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/2n2222a-d.pdf>. [Accessed: Nov. 02, 2018].
- [4] Yuanze Relay, “Y3FSS112DM0L01 (Y3F-SS-112DM) – Sealed Subminiature Relay. Datasheet,” Yuanze Relay, [Online]. Available: https://datasheet.lcsc.com/lcsc/1811121513_Yuanze-Relay-Y3F-SS-112DM_C35406.pdf. [Accessed: Apr. 23, 2025].

Лебедь Денис Юрійович – асистент кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту, e-mail: 4e15b.lebyd@gmail.com;

Кафедра електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту,

Вінницький національний технічний університет, Вінниця.

Lebed Denys Yuriyovych – Assistant Professor of the Department of Electrical Engineering Systems of Electricity Consumption and Energy Management, e-mail: 4e15b.lebyd@gmail.com;

МОНІТОРИНГ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗАЛІЗНИЦЬ¹Інститут електродинаміки НАН України, м.Київ.**Анотація**

Засоби моніторингу в системах електропостачання залізниць будуються за вимогами, що відповідають ієрархії побудови структури електропостачання, а також наявності надійних датчиків інформації та засобів реєстрації контрольованих параметрів, що використовують сучасні інформаційні технології.

Ключові слова: моніторинг, реєстрація параметрів, електропостачання залізниць, підсистема

Abstract

The monitoring facilities in railway power supply systems are built according to the requirements that correspond to the hierarchy of power supply structure construction, as well as the availability of reliable information sensors and means of recording controlled parameters using modern information technologies.

Keywords: monitoring, parameter registration, railway power supply, subsystem

Вступ

"Укрзалізниця", включає Державну адміністрацію залізничного транспорту і шість регіональних залізниць: Південно-Західну; Південну; Донецьку; Львівську; Придніпровську і Одеську. Електричні мережі залізниць відносяться до класу територіально розподілених електричних об'єктів, автоматизація управління яких потребує розв'язку широкого спектру задач економічного, диспетчерського, технологічного та експлуатаційного управління на різних рівнях ієрархії. Інтегрована система моніторингу контактних електричних мереж залізниць належить до класу складних багатопозиційних систем керування територіально розподіленими об'єктами з рухомими навантаженнями. Функції моніторингу в ній розподілені у відповідності зі структурою "Укрзалізниці". Таке рішення дозволяє мати доступ до інформації спеціалістам різних ієрархічних рівнів.

На рівні тягових підстанцій забезпечено:

- реєстрацію доаварійних, аварійних та післяаварійних режимів функціонування електричних контактних мереж з синхронізацією за часом та спрацьовуваннями систем захисту;
- визначення місця аварії та ідентифікація характеру пошкодження;
- діагностування стану високовольтної ізоляції введів силових трансформаторів під робочою напругою;
- комерційний облік електричної енергії за тарифами, диференційованими за зонами доби,
- технологічний облік електричної енергії по окремих фідерах;
- первинна обробка звітної інформації.
- формування та передача на верхній рівні керування експрес-інформації, всієї (повної) інформації;
- ведення бази даних (БД).

На рівні дистанції електропостачання здійснюється:

- збір даних від підпорядкованих тягових підстанцій, обробка, формування та архівація інформації;
- оперативне керування тяговою електричною мережею;
- ведення БД і формування звітних документів;
- передача інформації в диспетчерський центр залізниці.

На рівні диспетчерського центру залізниці здійснюється:

- обробка всієї інформації, що надходить з рівня дистанцій електропостачання, формування у відповідності з вимогами до державної та корпоративної нормативної бази різних файлів та відомостей для відповідних інженерних, економічних та адміністративних служб "Укрзалізниці", облэнерго, незалежних постачальників, енергоринку і таке інше;
- передача інформації в диспетчерський центр "Укрзалізниці" (верхній рівень керування електричними мережами).

На рівні диспетчерського центру "Укрзалізниці" здійснюється:

- аналіз інформації, що надходить від диспетчерських центрів шести регіональних залізниць;
- архівація інформації, ведення баз даних;

- генерація звітів перед Міністерством транспорту та зв'язку України, постачальниками електроенергії, фінансових звітів;
- координація керування електричними мережами залізниць і оптовою купівлею-продажем електроенергії.

Висновки

Реалізована на базі ІДК "Регіна" система моніторингу електричних мереж залізниць забезпечує комплексне вирішення головних завдань – підвищення надійності та ефективності функціонування тягових мереж залізниць і підвищення безпеки руху потягів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Стогний Б.С., Гримуд Г.И., Мольков А.Н., Сопель М.Ф., Павловський В.В. Некоторые тенденции развития АСУ технологическими процессами на подстанциях энергосистем//Технічна електродинаміка.-2003.-№5.-С.44-49.
2. Теоретические основы построения микропроцессорных систем в электроэнергетике/Стогний Б.С., Кириленко А.В., Проске Д. и др.:Под ред. Стогния Б.С., Кириленко А.В., Проске Д.; АН Украины. Ин-т электродинамики.-Киев:Наук.думка,1992.-320с.-ISBN 5-12-002981-1.
3. Савалов С.А. Режимы Единой энергосистемы.-М.:Энергоатомиздат,1983.-384с.
4. Савалов С.А., Семенов В.А. П ротивоаварийное управление в энергосистемах.- М.:Энергоатомиздат,1988.-416с
5. Орнов В.Г., Рабинович М.А. Задачи оперативного и автоматическогоуправления энергосистемами.-М.:Энергоатомиздат,1988.-223с.

Варський Григорій Мстиславович – канд. техн. наук, старший наук. співробітник, e-mail: varsky@ied.org.ua
Тутик Володимир Львович - канд. техн. наук, старший наук. співробітник, e-mail: twl@ukr.net
 Інститут електродинаміки НАН України

Varskyi Hrihoriy M. - Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, e-mail: varsky@ied.org.ua
Tutyk Volodymyr L. - Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, e-mail: twl@ukr.net

РОБАСТНА ОПТИМІЗАЦІЯ ПОТОКІВ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ У РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ НА ОСНОВІ ІДЕАЛЬНОГО СТРУМОРОЗПОДІЛУ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Роботу присвячено проблемі оптимізації розміщення додаткових джерел реактивної потужності (ДРП) у розподільних електромережах (ЕМ) з урахуванням невизначеності інформаційного забезпечення та режимних параметрів. Для розв'язання задачі запропоновано комплексний підхід, що полягає у поєднанні робастної оптимізації та результатів моделювання «ідеального» струмозподілу в ЕМ згідно принципу найменшої дії. Ефективність підходу підтверджено на прикладі розподільних мереж АТ «Вінницяобленерго».

Ключові слова: *розподільна мережа, джерело реактивної потужності, оптимізація, невизначеність вихідних даних, економічний опір, «ідеальний» струмозподіл.*

Abstract

The report is devoted to the problem of optimizing the placement of additional reactive power sources (RPS) in distribution power grids (PG), taking into account the uncertainty of information provision and operating parameters. To solve the problem, a comprehensive approach is proposed, which consists of combining robust optimization and the results of modeling the “ideal” current distribution in EM according to the principle of least action. The effectiveness of the approach is confirmed by the example of the distribution networks of JSC “Vinnytsiaoblenergo”.

Keywords: *distribution network, reactive power source, optimization, uncertainty of input data, economic resistance, “ideal” current distribution.*

Вступ

Сучасні енергопостачальні компанії в Україні є комерційними підприємствами для яких основною метою є отримання максимального прибутку, зокрема шляхом скорочення експлуатаційних витрат. Однак моральне та фізичне старіння основного обладнання електричних мереж (ЕМ), зростання вартості електроенергії на енергетичному ринку, жорсткі обмеження щодо її закупівлі [1] ускладнюють досягнення мети. Тому особливої актуальності набуває задача оптимізації перетікань реактивної енергії у цих мережах [2-4], зокрема, шляхом використання наявних та додаткових джерел реактивної потужності (ДРП). Керування потоками реактивної енергії у ЕМ дає змогу зменшувати технологічні витрати електроенергії незалежно від змін навантаження. Максимального ефекту тут можна досягти оптимізуючи розміщення та параметри ДРП з урахуванням змін умов економічної діяльності, змін у характері електроспоживання, а також режимів розосереджених джерел енергії (РДЕ). Виходячи з цього, в сучасних умовах невизначеність у постановці оптимізаційних задач, пов'язаних з розподілом реактивної енергії, необхідно враховувати. Це може призводити до неефективності класичних методів їх розв'язання.

Незважаючи на те, що розглянуті статті [1-4] дають уявлення про оптимізацію ДРП в розподільних мережах, зберігається розрив у розробленні комплексних моделей з урахуванням невизначеності, пов'язаної з розбудовою та генеруванням РДЕ, а також нестабільністю попиту на електроенергію. Тож у доповіді представлено новий підхід до планування заходів з компенсації реактивної потужності, що враховує означені фактори шляхом поєднання оптимізації на основі принципу найменшої дії [5] та робастної оптимізації [6]. Використання методу робастної оптимізації для врахування невизначеностей, пов'язаних з відновлюваними

джерелами енергії та коливаннями попиту, забезпечує надійний пошук рішення для різних сценаріїв ризику (мінімальний ризик, збалансований ризик та максимальний ризик).

Результати досліджень

У [6] показано, що для підвищення обчислювальної ефективності розв'язання оптимізаційних задач, пов'язаних з потоками енергії в розподільних мережах можна застосовувати комплексний підхід, що базується на використанні принципу найменшої дії. Застосування ПНД усуває проблеми надійності та швидкодії процесу пошуку оптимальних розв'язків для нелінійних задач, до яких належить задача оптимізації розміщення ДРП. Ефект досягається завдяки тому, що пошук оптимуму розпочинається з екстремального значення оптимізованих змінних, які відповідають деякому «ідеальному» режиму системи за енергетичним критерієм. Аналітичне визначення оптимізованих змінних, що відповідають рівнянням Ейлера-Лагранжа у просторі станів, виконується за заступною г-схемою ЕМ [6]. Для переходу від екстремального до оптимального розв'язку на оптимізовані змінні та режимні параметри накладаються обмеження. Для електромереж, оснащених ДРП та РДЕ, це потребує розв'язання допоміжної задачі оптимізації, як показано в [2]. Під час розв'язання задачі всі незалежні та режимні параметри вважаються детермінованими, що суперечить сутності задачі, особливо коли її результати використовують для формування проектних рішень.

В реальних розподільних мережах невизначеність притаманна коливанням виробництва відновлюваної енергії, змінним потребам в енергії, волатильності цін електроенергії та відмовам обладнання. Врахування цих невизначеностей має вирішальне значення для отримання обґрунтованого ефекту від впровадження проектних рішень, зокрема й з впровадження ДРП. Робастна оптимізація – це математичний підхід, який дає змогу розробляти ефективні рішення в невизначених умовах [6]. Тож у доповіді пропонується поєднання алгоритмів пошуку оптимуму на основі ПНД та робастної оптимізації, аналізуються різні рівні ризиків, наводяться математичні формулювання для кожного з них і обговорюється, як включення робастної оптимізації в модель економічного струморозподілу може підвищити ефективність проектних рішень.

Робастна оптимізація забезпечує пошук рішень, які забезпечують прийнятний результат для всіх (або більшості) можливих реалізацій невизначеності в рамках заздалегідь визначеного набору. Сутність підходу полягає в тому, що замість оптимізації одного очікуваного сценарію, робастна оптимізація дає змогу отримувати рішення, які є «несприйнятливими» до невизначеності [6]. Це забезпечує низку переваг, зокрема рішення виявляються здійсненими за різних умов невизначеності, а особи, що приймають рішення мають можливість контролювати рівень консерватизму під час планування. Так, оптимізація з мінімізацією ризику оминає сумнівні результати, пропонуючи консервативні рішення, які будуть давати позитивний ефект за найнесприятливіших умов. З іншого боку оптимізація з максимальним ризиком, враховує такі результати заради максимізації потенційних прибутків. Очевидно, що це супроводжується збільшенням вразливості до невизначеності. Для врахування невизначеності окремих параметрів формують набори їх значень, які описують діапазон їх зміни. Двома поширеними видами є еліпсоїдні та коробчасті набори невизначеності.

Адекватність та ефективність запропонованого комплексного підходу з оптимізації розміщення ДРП було показано на прикладі розподільних мереж 110-35 кВ ПАТ «Вінницяобленерго». Оптимальні місця встановлення ДРП визначалися за методом «ідеального» струморозподілу [6], а доцільність розміщення ДРП та їх потужність оцінювалася на основі робастної оптимізації. За результатами досліджень визначено оптимальну послідовність впровадження ДРП, яка характеризується мінімальним та максимальним ризиком з огляду на повернення капіталовкладень (табл. 2). За результатами розрахунків встановлено 13 місць встановлення ДРП, які мають найвищу стійкість до невизначеності параметрів. Імітаційні розрахунки показали, що їх введення в експлуатацію забезпечує біля 75% сукупного ефекту зменшення втрат електроенергії. Разом з тим, укрупнена вартість становить лише 29% від сукупної вартості.

Таблиця 1 – Результати оцінювання ефекту від впровадження ДРП в електричних мережах ПАТ «Вінницяобленерго»

Рік розрахункового періоду	2025	2027	2028	2029	2030	2031
Оптимальне рішення з максимальним ризиком						
Сумарна потужність ДРП, Мвар	62,1	109,8	134,6	134,6	134,6	134,6
Сумарні капіталовкладення, тис грн	27755,8	64154,9	95688,9	95688,9	95688,9	95688,9
Надходж. від зменш. втрат, тис грн	6767,0	14978,3	23700,2	31153,5	35137,2	47730,8
Кумулятивний ефект, тис грн	-22746,5	-40976,0	-39685,5	4543,9	31732,0	101652,3
Оптимальне рішення з мінімальним ризиком						
Сумарна потужність ДРП, Мвар	62,1	62,1	62,1	62,1	62,1	62,1
Сумарні капіталовкладення, тис грн	27755,8	27755,8	27755,8	27755,8	27755,8	27755,8
Надходж. від зменш. втрат, тис грн	6767,0	8694,6	11264,8	15119,9	17176,0	24500,9
Кумулятивний ефект, тис грн	-22746,5	-10353,1	7221,6	29438,0	43190,9	79764,0

Висновки

Показано можливість врахування невизначеностей незалежних параметрів в задачі оптимізації розміщення джерел реактивної потужності у розподільних мережах з РДЕ шляхом поєднання робастної оптимізації та методу «ідеального» струморозподілу, що дає змогу звести задачу до оптимізації низки нормальних режимів ЕМ за критерієм мінімуму втрат електроенергії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Стогній Б.С., Кириленко О.В., Денисюк С.П. Інтелектуальні електричні мережі електроенергетичних систем та їх технологічне забезпечення // Технічна електродинаміка. – 2015. – №6. – С. 44–50.
2. V. Kulyk, O. Burykin, V. Pirnyak. "Optimization of the placement of reactive power sources in the electric grid based on modeling of its ideal modes", Technology audit and production reserves, 2018, vol. 1, no. 2(40). pp. 59-65. – doi: 10.15587/2312-8372.2018.129237.
3. F. Hinz and D. Moest, "Techno-economic Evaluation of 110 kV Grid Reactive Power Support for the Transmission Grid", IEEE Transactions on Power Systems, 2018, vol. PP, no. 99. – doi: 10.1109/TPWRS.2018.2816899
4. Kaloudas and R. Shaw, "Long-term forecasting of reactive power demand in distribution networks", CIRED - Open Access Proceedings Journal, vol. 2017, no. 1, pp. 2406-2410, 10, 2017. doi: 10.1049/oap-cired.2017.0182
5. Принцип найменшої дії в електротехніці та електроенергетиці [П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик, В. В. Нетребський, В. В. Тептя]: Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2014. – 212 с. – ISBN 978-966-641-576-2.
6. Y. Li, M. Han, M. Shahidehpour, J. Li, and C. Long, "Data-driven distributionally robust scheduling of community integrated energy systems with uncertain renewable generations considering integrated demand response," Applied Energy, vol. 335. 120749, 2023.

Кулик Володимир Володимирович - д. т. н., проф. кафедри електричних станій та систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: volodymyrvkulyk@gmail.com

Поліщук Андрій Леонідович - докторант, кафедри електричних станій та систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: andriypol@gmail.com

Kulyk Volodymyr V. D.Sc, professor of the Department of Power Plants and Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: volodymyrvkulyk@gmail.com

Polischuk Andriy L. – doctoral student, of the Department of Power Plants and Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: andriypol@gmail.com

УПРАВЛІННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯМ НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЇ ПРОМИСЛОВОГО ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

Луцький національний технічний університет

Анотація

Запропоновано вирішення актуальної наукової задачі: розробка методів і моделей зменшення вартості спожитої електроенергії на основі впровадження системи технічного моніторингу через впровадження технології IIOT (Industrial Internet of Things).

Ключові слова: система електропостачання, енергоспоживання, холодильні установки, ефективність енергоспоживання, IIOT (Industrial Internet of Things).

Abstract

A solution to a pressing scientific problem is proposed: the development of methods and models for reducing the cost of consumed electricity based on the implementation of a technical monitoring system through the implementation of IIOT (Industrial Internet of Things) technology.

Keywords: power supply system, energy consumption, refrigeration, energy efficiency, IIOT (Industrial Internet of Things).

Вступ

Пошук шляхів зменшення вартості електричної енергії (як спожитої так і прогнозованої) є одним із дієвих шляхів забезпечення економічно-ефективної діяльності підприємства. Виходячи з цього, прогнозування електроспоживання є одним із найважливіших етапів управління ефективним використанням енергетичних ресурсів на підприємствах, оскільки напрями управляючих дій зручно обирати на основі отриманих прогнозів можливих змін кількісних характеристик. Прогнозування електроспоживання може здійснюватись на основі різних методів. Від вибору оптимального методу прогнозування залежить забезпечення раціонального споживання електричної енергії об'єктами підприємства на певний період та дієвість управління споживання електричної енергії. Одним з шляхів підвищення ефективності є управління режимами енергоспоживання на основі побудови моделей управління холодильними установками [1].

Результати дослідження

Виходячи з проведених досліджень [2] процес енергоспоживання холодильної установки, можна представити у вигляді функції, параметрами якої є: внутрішні температури – $t_{\text{вн}}$; зовнішні температури – $t_{\text{зовн}}$; корекція режимів роботи внаслідок відкриття дверних отворів – k_1 ; рівень заповнення холодильної установки – k_2 ; температура морозильних камер – t_m .

Сумісний графік навантаження і температури чітко показує кореляцію процесів зміни навантаження і дещо відтермінованої в часі зміни температури (рис. 1).

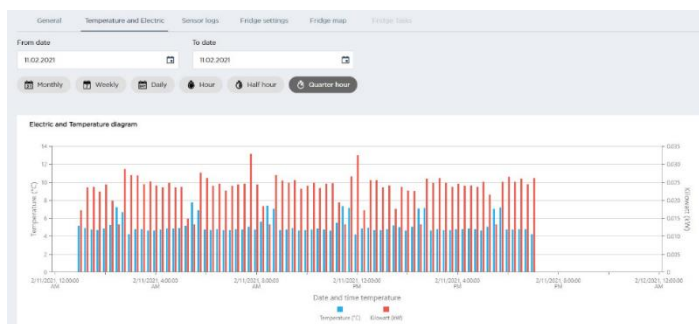


Рис. 1. Сумісні графіки навантаження та температур

Підключена до системи нейронна мережа розпізнає кількість і тип завантаженої продукції (рис. 2).



Рис. 2. Розпізнавання продукції в холодильній установці

Висновки

Запропоновано розробку методів і моделей зменшення вартості спожитої електроенергії на основі впровадження систем технічного моніторингу. Для керування навантаженням системи електропостачання необхідно використовувати комплексну модель, що в результаті приведе до зменшення оплати за електроенергію та зменшення втрат електроенергії від нерівномірності добового навантаження в мережах. На основі запропонованої моделі та сучасної технології IIoT (Industrial Internet of Things) створені комп'ютерні програми, які використовують сучасні бібліотеки введення, обробки та представлення інформації, дозволяючи інтегрувати їх в сучасні системи управління виробництвом.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. R. Stamminger, «Modelling of domestic refrigerators' energy consumption under real life conditions in Europe». Available: <https://d-nb.info/1016121296/34>.
2. Thomas, S. Erhebung des Verbraucherverhaltens bei der Lagerung verderblicher Lebensmittel in Europa. Diss. University of Bonn, Aachen: Shaker Verlag. 2007.

Коменда Наталія Володимирівна — канд. техн. наук, доцент кафедри електричної інженерії, Луцький національний технічний університет.

Волинець Владислав Ігорович — канд. техн. наук, доцент кафедри електричної інженерії, Луцький національний технічний університет.

Komenda Natalia V. — Cand. Sc. (Eng), Assistant Professor of Electrical Engineering, Lutsk National Technical University, Lutsk

Volynets Vladyslav Ih. — Cand. Sc. (Eng), Assistant Professor of Electrical Engineering, Lutsk National Technical University, Lutsk

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ВУГІЛЬНИХ ШАХТ

Луцький національний технічний університет

Анотація

Запропоновано процедуру оцінювання енергоефективності вугільних шахт, яка заснована на багатомірному порівнянні із застосуванням ранжування за правилом Кондорсе. Ця процедура передбачає врахування технологічного процесу та умов функціонування вугільної шахти.

Ключові слова: енергоефективність, вугільна шахта, ранжування, правило Кондорсе.

Abstract

Procedure for evaluating the energy efficiency of coal mines is proposed, which is based on a multivariate comparison with the application of ranking according to the Condorcet's rule. This procedure involves taking into account the technological process and operating conditions of the coal mine.

Keywords: energy efficiency, coal mine, ranking, Condorcet's rule.

Вступ

Однією з основних складових підвищення рівня оцінювання енергоефективності вугільних шахт є здійснення дій щодо використання та впровадження адекватного оцінювання рівня їх енерговикористання та стану енергозбереження [1]. Для цього потрібно застосовувати такий механізм оцінювання, який би дозволив здійснювати оцінювання та аналіз показників які мають неоднаковий вплив на ефективність енерговикористання.

Результати дослідження

Актуальним в цьому напрямку є визначення універсальних правил проведення оціночних заходів, які охоплюють усі ключові напрямки відслідковування рівня ефективності енерговикористання за допомогою ранжування будівель. Результатом ранжування є деяка кількість рейтингів, за допомогою яких і проводиться оцінка рівня ефективності енерговикористання.

Для цього використовуємо ранжування за правилом Кондорсе [2], яке передбачає парні порівняння об'єктів дослідження. «Перемагає» той об'єкт дослідження, який переважає усіх інших. Тобто, найкращою вугільною шахтою називається така шахта і (за необхідності вона є однією), яка є кращою будь-якої іншої за правилом більшості рейтингових показників.

Графічну інтерпретацію проведеного ранжування подано на рис. 1.

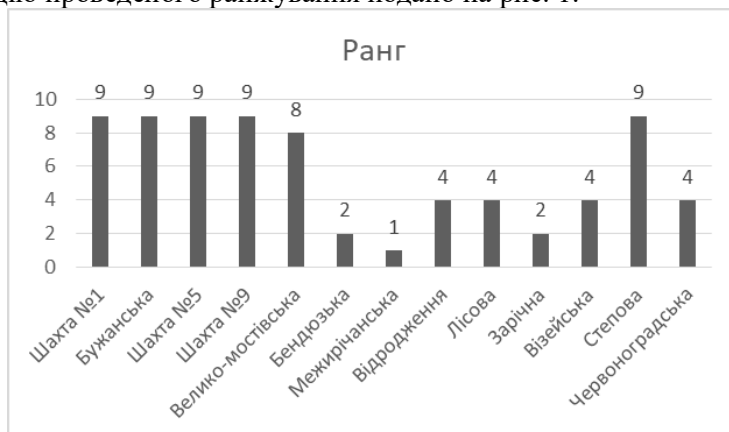


Рис. 1. Діаграма ранжування вугільних шахт

Висновки

Проведення ранжування за правилом Кондорсе дає нам змогу визначити рейтинг енергоефективності вугільних шахт і визначити певну кількість вугільних шахт з найгіршим рівнем енерговикористання (це усі шахти ДП «Волиньвугілля» та «Степова»). Використовуючи результати рейтингування можна впроваджувати різноманітні заходи, які б дозволили покращити стан енерговикористання на вугільних шахтах. З метою підвищення інформативності результатів процедури оцінювання енергоефективності необхідно враховувати також інтенсивність виробничого процесу та умови функціонування об'єкту. Множина критеріїв для порівняння об'єктів поряд з показниками енергоефективності повинна містити також і технологічні параметри.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. J. Flizikowski, K. Bielinski, "Technology and Energy Sources Monitoring: Control, Efficiency, and Optimization", USA: IGI GLOBAL, 260 p, 2013.

2. В.П. Розен, І.В. Яковчук, І.М. Шарий, "Оцінювання енергоефективності в навчальних закладах з використанням правила ранжування Кондорсе за показниками впливу на рівень їх енерговикористання", Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Гірництво», №34, С. 66-72, 2017.

Волинець Владислав Ігорович — канд. техн. наук, доцент кафедри електричної інженерії, Луцький національний технічний університет.

Романюк Микола Валентинович — канд. техн. наук, доцент кафедри електричної інженерії, Луцький національний технічний університет.

Коменда Наталія Володимирівна — канд. техн. наук, доцент кафедри електричної інженерії, Луцький національний технічний університет.

Volynets Vladyslav Ih. — Cand. Sc. (Eng), Assistant Professor of Electrical Engineering, Lutsk National Technical University, Lutsk

Romaniuk Mykola V. — Cand. Sc. (Eng), Assistant Professor of Electrical Engineering, Lutsk National Technical University, Lutsk

Komenda Natalia V. — Cand. Sc. (Eng), Assistant Professor of Electrical Engineering, Lutsk National Technical University, Lutsk

ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ЗРИВУ ФЕРОРЕЗОНАНСНИХ ПРОЦЕСІВ В ЕЛЕКТРОМЕРЕЖАХ 10 КВ

Національний університет «Львівська політехніка»

Анотація

Досліджено ферорезонансні процеси (ФРП) в електричних мережах 10 кВ з різною кількістю працюючих трансформаторів напруги (ТН) та визначено діапазони ємнісних струмів замикання на землю за яких ФРП є стійким. Встановлено, що кількості ТН в мережах 10 кВ відповідає свій діапазон ємнісних струмів замикання на землю. Із збільшенням кількості ТН в мережі розширюються діапазони ємнісних струмів замикання на землю за яких виникають стійкі ФРП. Запропоновано метод зриву стійких ФРП в електричних мережах 10 кВ та досліджено його ефективність.

Ключові слова: ферорезонансний процес, електрична мережа з ізольованою нейтраллю, трансформатор напруги

Abstract

Ferroresonant processes (FRP) in 10 kV electrical networks with different numbers of operating voltage transformers (VT) have been studied, and the ranges of capacitive earth-fault currents at which FRPs are stable have been determined. It has been established that each number of VTs in 10 kV networks corresponds to its own range of capacitive earth-fault currents. As the number of VTs in the network increases, the ranges of capacitive earth-fault currents at which stable FRPs occur also expand. A method for suppressing stable FRPs in 10 kV electrical networks has been proposed, and its effectiveness has been investigated.

Keywords: ferroresonant process, electrical network with isolated neutral, voltage transformer

Вступ

Розподільні електричні мережі 10 і 35 кВ України можуть працювати з ізольованою нейтраллю. Процеси під час замикання однієї фази на землю в таких мережах призводять до виникнення ферорезонансних процесів (ФРП) зумовлених утворенням контуру між ємністю мережі та нелінійною індуктивністю трансформаторів напруги (ТН). Здебільшого ФРП в електричних мережах самочинно згасають за декілька періодів промислової частоти. Але за певного співвідношення ємнісного струму замикання мережі та параметрів трансформаторів напруги (характеристик їх кривих намагнічування, конструкції магнітної системи тощо) ФРП може бути стійким (довготривалим), внаслідок чого може відбуватися термічне пошкодження ТН та іншого електрообладнання [1-3]. Тривалість такого ФРП обмежується часом спрацювання засобів з його недопущення (зриву), а за відсутності таких в мережі - часом до моменту пошкодження трансформаторів напруги чи зміни конфігурації електромережі [3].

Для зривання стійких ФРП в мережі та захисту трансформаторів напруги від пошкоджень використовують пристрої захисту, дія яких спрямована на під'єднання гасильного опору до обмотки «розімкненого трикутника» ТН [3]. Такий принцип реалізують пристрої типу ПЗФ, які експлуатуються в електромережах 10 - 35 кВ вже понад 25 років. Разом з тим, в експлуатації зафіксовано випадки неефективного зривання ФРП в мережі за спрацювання пристроїв ПЗФ. Такі події мали місце через зміни конфігурації мережі та, відповідно, зміну кількості працюючих ТН, обладнаних пристроями ПЗФ.

Результати дослідження

Використовуючи цифрове моделювання, проведено дослідження ферорезонансних процесів в радіальних електричних мережах 10 кВ з різною кількістю працюючих ТН та визначено діапазони ємнісних струмів замикання на землю за яких ФРП буде стійким. Встановлено, що кількості ТН в мережах 10 кВ відповідає свій діапазон ємнісних струмів замикання на землю. Із збільшенням кількості трансформаторів напруги в мережі розширюються діапазони ємнісних струмів замикання на землю за яких виникають стійкі ФРП. Так, в ЕМ 10 кВ з ТН типу НТМИ-10 за номінальної напруги мережі одному трансформатору напруги відповідає діапазон ємнісних струмів замикання на землю від 0,5 А до 2,5 А, а трьом ТН – від 1,5 А до 7,65 А.

Результати моделювання ФРП в електричних мережах 10 кВ з групою ТН показали, що причиною неуспішного зривання стійкого ФРП можуть бути: зміна конфігурації мережі; зміна кількості працюючих ТН; встановлення в мережі ТН з пристроями ПЗФ та ТН без пристроїв ПЗФ. Окрім цього, особливістю протікання тривалого ФРП в електричних мережах 10 кВ з групою ТН, обладнаних пристроями ПЗФ, є те, що для успішного його зривання повинні синхронно спрацювати усі пристрої ПЗФ, причому ними повинні бути обладнані щонайменше 80% зі всіх трансформаторів напруги в електрично зв'язаній мережі. Якщо дана умова не виконується, то ферорезонансний процес не зривається.

Було запропоновано метод зриву стійких ФРП та досліджено його ефективність в електричних мережах 10 кВ які працюють з ізольованою нейтраллю. Суть методу ґрунтується на короткочасному ввімкненні у нейтраль силового трансформатора активного опору. Запропонований метод зривання стійких ФРП в електричних мережах 10 кВ з ізольованою нейтраллю, як показали дослідження, є ефективним незалежно від кількості ТН в мережі та їх типу, а також незалежно від того, чи встановлені на них пристрої зривання стійких ФРП чи відсутні. За результатами дослідження визначено оптимальне значення величини опору, підключення якого до нейтралі силового трансформатора призводить до зривання стійких ФРП. Розроблено принцип технічної реалізації методу «нейтраль силового трансформатора-резистор».

Висновки

За результатами дослідження встановлено, що збільшення кількості ТН в ЕМ 10 кВ призводить до розширення діапазону ємнісних струмів замикання на землю мережі за яких субгармонійний ФРП є стійким. При цьому існує діапазон ємнісних струмів замикання на землю мережі від 1,35А до 2,85 А за яких ФРП може бути стійким як з одним ТН, так і з двома ТН, так і з трьома ТН, що необхідно враховувати під час зміни схеми мережі.

Запропоновано метод зриву стійких субгармонійних ФРП, який, як показали результати цифрового моделювання, ефективно зриває стійкі ФРП в електромережах 10 кВ незалежно від кількості ТН та їх типу. При цьому немає потреби у додатковому використанні пристроїв захисту ТН від ФРП.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. CIGRE Technical Report 569, "Resonance and Ferroresonance in Power Networks", 2014 <https://www.scribd.com/document/513700815/ELT-272-9>
2. Martínez R., Manana M., Rodríguez J. A. *et al.* Ferroresonance Phenomena in Medium-Voltage Isolated-Neutral Grids: A Case Study. *IET Renewable Power Generation*. 2018. DOI: 10.1049/iet-rpg.2018.5231.
3. Журахівський А. В. Ферорезонансні процеси та захист трансформаторів напруги в електричних мережах 6-35 кВ: монографія / А. В. Журахівський, З. М. Бахор, О. І. Ганус, П. П. Говоров, А. Я. Яцейко. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2019. – 324 с

Бахор Зіновій Михайлович - кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електроенергетики та систем управління, Національний університет «Львівська політехніка», Львів, e-mail: zinovii.m.bakhor@lpnu.ua

Яцейко Андрій Ярославович — кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електроенергетики та систем управління, Національний університет «Львівська політехніка», Львів, e-mail: andrii.y.yatseiko@lpnu.ua

Zinovii Bakhor - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Electric Power Engineering and Control Systems, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine, e-mail: zinovii.m.bakhor@lpnu.ua

Andrii Yatseiko - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Electric Power Engineering and Control Systems, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine, e-mail: andrii.y.yatseiko@lpnu.ua

СУЧАСНІ ВИМОГИ ТА МОЖЛИВОСТІ АВТОМАТИЗАЦІЇ РЕЗЕРВНИХ ДИЗЕЛЬ-ЕЛЕКТРИЧНИХ АГРЕГАТІВ І АГРЕГАТНИХ ПРИМІЩЕНЬ

¹Харківський національний університет Повітряних Сил

²Науково-виробничо-монтажне підприємство “Зв'язокЕнергоСервіс”

Анотація.

Наведені вимоги до функцій апаратури автоматизації дизель-електричних агрегатів резервного електроживлення і агрегатних приміщень. Показані умови різних ступенів автоматизації, які мають бути забезпечені оснащенням агрегатів відповідними давачами стану і виконавчими пристроями.

Ключові слова: дизель-електричний агрегат; операції автоматизації; резервне електроживлення; рівень автоматизації; умови автоматизації.

Abstract.

The requirements for the functions of the automation equipment of diesel-electric units of backup power supply and unit premises are given. The conditions of various degrees of automation, which must be ensured by equipping the units with appropriate status sensors and actuators, are shown.

Keywords: diesel-electric aggregate; automation operations; backup power supply; automation level; automation conditions.

Вступ

Забезпечення резервного електроживлення об'єктів критичної інфраструктури залишається актуальним протягом багатьох років через планові та аварійні вимкнення електроенергії у промислових електромережах. Для споживачів з потрібною потужністю 10 кВт і більше резервними джерелами електропостачання є дизель-електричні агрегати різних ступенів автоматизації, вимоги до яких встановлені стандартами [1] – [3] (незалежно від чинності цих стандартів в Україні їх положення є орієнтиром у питаннях автоматизації резервного електропостачання). Автономність роботи резервних джерел електроживлення (електростанцій) має забезпечувати апаратура автоматизації усіх основних та допоміжних технологічних процесів та сервісних функцій, що можна показати на прикладі апаратури ряду ІШЩ-3 [4] вітчизняного розроблення та виробництва:

- Забезпечення готовності до негайного запуску і приймання навантаження: підігрівання двигуна, запуск на самопідігрів у разі відсутності напруги промислової мережі або несправності електропідігрівача, що особливо важливо в холодну пору року, автоматичне заряджання акумуляторних батарей;

- Контроль стану агрегатного приміщення: пожежна та охоронна сигналізація, контроль температури з аварійною сигналізацією перегріву або переохолодження;

- Контроль перебування напруги промислової мережі у заданих межах, переведення живлення споживачів з мережі на резервний агрегат і переведення на промислову мережу після появи її напруги або відновлення параметрів;

- Дистанційний контроль стану агрегату, апаратури автоматики і агрегатного приміщення за інформацією, що відображається на дисплеї пульта, винесеного в приміщення чергового персоналу;

- Автоматичний або автоматизований з місцевого або дистанційного пультів керування запуск агрегату виконанням передбачених для конкретного типу агрегату передпускових та пускових операцій: виведення паливного насоса в пускове положення (якщо передбачено), прокачка палива та/або масла з контролем тиску, вмикання стартера, контроль запуску, виведення паливного насоса в робоче положення (якщо передбачено), контроль збудження генератора, напруги і частоти, вмикання навантаження;

- Контроль стану працюючого агрегату і агрегатного приміщення: наявність/відсутність аварійних сигналів щодо параметрів двигуна та генератора, вмикання/вимикання приточної та витяжної вентиляції залежно від температури приміщення, поповнення розхідного паливного бака від резервного сховища;

- Автоматична або автоматизована нормальна зупинка з виконанням передзупинкових та зупинкових операцій, автоматична аварійна або екстрена зупинка у випадках, передбачених Технічними умовами агрегату;

- Ведення електронного формуляра (аналог “чорного ящика”) з фіксацією всіх змін у мережі, стані агрегату, агрегатного приміщення, апаратури автоматики з прив’язкою до дати і часу події;

- Диспетчерський контроль поточного стану, запуск і зупинка агрегату з персонального комп’ютера, виклик на відображення електронного формуляра для перевірки минулих подій, що відбулись, наприклад, у неробочий час.

Для автоматизації за другим та третім ступенем дизель-електричні агрегати, наприклад, підприємства “Південдизельмаш”, що десятиріччями працювало донедавна, оснащені давачами параметрів двигуна та генератора порогового типу і виконавчими пристроями дискретного типу ввімкнене/вимкнене. Найбільш розвинута (за четвертим ступенем) автоматизація агрегатів можлива за умови оснащення або дооснащення давачами вимірювального типу і виконавчими пристроями плавного регулювання.

За умови використання сучасних комп’ютерних технологій контролю і керування має зберігатись принцип “поступової деавтоматизації” [4], за якого апаратура може з режиму автоматичного керування перемикатись в автоматизований режим (запуск/зупинка за командою оператора), наприклад, в умовах постійних стрибків напруги або в ручний режим у разі пошкоджень чи виходу з ладу мікропроцесорного контролера, інших пристроїв.

Практика експлуатації апаратури ряду ІШЩ-3 [4] на об’єктах державних підприємств “Укртелеком” та “Укрерорух” підтвердила необхідність реалізації зазначених функцій автоматизації, зокрема нової на початок робіт функції контролю і керування за допомогою персонального комп’ютера, які корегувались з урахуванням вимог інституту “Діпрозв’язок”, обласних проєктних установ та рекомендацій експлуатантів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. ГОСТ 10032-80. Дизель-генераторы стационарные, передвижные, судовые вспомогательные. Технические требования к автоматизации. На заміну ГОСТ 10032-69; чинний від 1982-01-01. М: Вид. стандартів, 1981. 6 с.
2. ГОСТ 14228-80. Дизели и газовые двигатели автоматизированные. Классификация по объему автоматизации. На заміну ГОСТ 14228-69; чинний від 1982-01-01. М: Вид. стандартів, 1981. 8 с.
3. ГОСТ 13822-82. Электроагрегаты и передвижные электростанции дизельные. Общие технические условия. На заміну ГОСТ 13822-76 та ГОСТ 21670-76; чинний від 1984-01-01. Зі зміною № 1. М: Вид. стандартів, 1989. 22 с.
4. Апаратура автоматизації дизель-електричних агрегатів і агрегатних приміщень ІШЩ-3С: Керівництво з експлуатації ААБХ.656343.001 РЭ. Харків: НВМП “Зв’язокенергосервіс”, 2004. 44 с.

Лещенко Сергій Петрович – доктор технічних наук, професор, головний науковий співробітник наукового центру Повітряних Сил, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків.

Маляренко Олександр Сергійович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник науково-дослідного відділу наукового центру Повітряних Сил, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, e-mail: a_mal@meta.ua.

Пехота Василь Миколайович – директор Науково-виробничо-монтажного підприємства “Зв’язокЕнергоСервіс”, м. Харків.

Sergiy Leshchenko – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head Researcher of Air Force Science Center, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv.

Oleksandr Maliarenko – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Leading Researcher of Scientific Research Department of Air Force Science Center, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, e-mail: a_mal@meta.ua

Vasyl Pekhota – Director of the Scientific-Production-Assembly Enterprise “ZvyazokEnergoService”, Kharkiv.

СТРАТЕГІЇ УПРАВЛІННЯ ПОПИТОМ ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ ЗАВДАНЬ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ПЕРЕХОДУ

Луцький національний технічний університет

Анотація.

Досягнення глобальної цілі кліматичної нейтральності вимагає стримування зростання попиту на енергію та забезпечення декарбонізації енергетичного сектору шляхом переходу на відновлювальні джерела енергії (ВДЕ) та інші чисті види енергії [1]. Енергетичний перехід вимагає змін у процесах виробництва, постачання, передачі та споживання енергії, передбачає ефективне використання енергії та зменшення попиту на енергію в усіх секторах економіки.

Ключові слова: відновлювальні джерела енергії; управління на стороні енергопостачання; управління на стороні споживача.

Abstract.

Achieving the global goal of climate neutrality requires curbing energy demand growth and ensuring the decarbonization of the energy sector by transitioning to renewable energy sources (RES) and other clean energy sources [1]. Energy transformation requires changes in the processes of energy production, supply, transmission, and consumption, and also involves the efficient use of energy and reducing energy demand in all sectors of the economy.

Keywords: renewable energy sources; energy supply management; consumption management.

Вступ

В електроенергетичній галузі для досягнення цілей енергетичного переходу застосовуються заходи щодо ефективного використання енергетичних ресурсів зі сторони постачальника та зі сторони споживача. Управління на стороні енергопостачання (Supply-Side Management, SSM) передбачає планування та оптимізацію процесу виробництва, передачі та розподілу енергії від різних джерел генерації для покриття попиту та підвищення надійності електропостачання. Управління на стороні споживача (Demand-Side Management, DSM) спрямоване на зниження попиту на енергію шляхом використання фінансових стимулів зі сторони енергопостачальної компанії або реалізації ініціатив з енергоефективності. DSM передбачає планування, контроль та оптимізацію процесу енергоспоживання для підвищення його ефективності, а також зниження споживання в години пік, в тому числі, шляхом інтеграції в систему енергопостачання ВДЕ та засобів акумулювання енергії. DSM передбачає два напрямки реалізації, що мають різну тривалість впливу на поведінку споживача: 1) програми підвищення енергоефективності, що мають довгострокову перспективу; 2) механізми керування попитом короткострокової перспективи - реагування на попит (Demand Response, DR). Програми енергоефективності спрямовані на зниження загального попиту на енергію шляхом впровадження заходів з підвищення ефективності енергоспоживання та енергозбереження. Їх реалізація вимагає глибокого аналізу використання енергоресурсів з урахуванням особливостей технології енергоспоживання кінцевого споживача. DR спрямовані на зниження пікового навантаження шляхом зміни профілю споживання енергії кінцевого споживача і тимчасове зниження обсягів енергоспоживання у відповідь на цінові сигнали ринку енергії для підтримання балансу між попитом на енергію та пропозицією. Основою DR є мотивація кінцевого споживача з боку енергопостачальної компанії до зміни моделі споживання шляхом застосування програм на основі стимулювання та програм на основі ціни. Зміну профілю навантаження для реалізації стратегії DR забезпечують такі заходи вирівнювання графіка електричного навантаження (ГЕН) енергосистеми, як заповнення провалу, зміщення навантаження, обмеження пікового навантаження, гнучке формування навантаження. Застосування ВДЕ для генерації електроенергії на стороні кінцевого споживача є одним із способів зміни профілю навантаження та важливим інструментом DSM в сучасних електричних мережах. Крім того, розвиток електромобільності потребує вирішення питання ефективності інтеграції електромобілів в електричну мережу. Масове впровадження електромобілів зумовлює розвиток інфраструктури зарядних станцій, характер графіка навантаження яких визначає споживчий попит власників електромобілів. Структура парку та циклу руху електромобілів, стратегія зарядки та режим роботи зарядних станцій мають суттєвий вплив на ефективність функціонування енергосистеми та електричних мереж. Розвиток технології двонаправленої зарядки сприяє розширенню можливостей вирівнювання ГЕН енергосистеми завдяки технології керованої зарядки, а також шляхом використання електромобілів як накопичувачів енергії від сонячних електростанцій та джерел енергії для покриття пікових навантажень. Поєднання інтеграції ВДЕ в систему електропостачання кінцевого споживача, заходів енергоефективності та DR забезпечує зниження як

загального, так і пікового попиту на енергію. Ефективна реалізація стратегій DSM та SSM вимагає отримання точних прогнозів і планів споживання енергії та генерації енергії ВДЕ для планування ефективного енергопостачання. Синтез стратегій DSM та SSM, доповнений впровадженням системи інтелектуальних вимірювань та стратегій інтелектуального моніторингу, контролю та управління, сприяють підвищенню ефективності кінцевого енергоспоживання і загальної енергоефективності енергосистеми.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. IEA (2023), *Credible pathways to 1.5°C: Four pillars for action in the 2020s*, IEA, Paris, 17 p. <https://www.iea.org/reports/credible-pathways-to-150c>

Давиденко Людмила Валеріївна – д-р техн. наук, професор кафедри електричної інженерії, Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, e-mail: l.davydenko@lutsk-ntu.com.ua

Davydenko Liudmyla V. – Dr. Sc. (Eng.), Professor of Electrical Engineering, Lutsk National Technical University, Lutsk, email : l.davydenko@lutsk-ntu.com.ua

ФРЕЙМВОРК WEB-ДОДАТКУ ДЛЯ ТОРГІВЛІ ЕЛЕКТРО-ЕНЕРГІЇ З ІНТЕГРАЦІЄЮ ТЕХНОЛОГІЙ БЛОКЧЕЙН ТА ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

¹ Луцький національний технічний університет

Запропоновано спосіб взаємодії просьюмера і споживача для реалізації механізму P2P-торгівлі, який базується на застосуванні технології блокчейн та інтернету речей та забезпечує безпечну комунікацію для обміну електроенергією та даними між учасниками платформи для торгівлі електроенергією без залучення третьої сторони. Технології інтернету речей використано для моніторингу виробництва і споживання електроенергії, передачі інформації, що генерується пристроями інтернету речей фізичного рівня, хмарним сервісам та обміну між вузлами мережі. Технологія блокчейн застосовується для підтримки зв'язку між пристроями інтернету речей, забезпечення надійності даних, конфіденційності та безпеки транзакцій. Інтерфейс користувача веб-додатку платформи торгівлі електроенергією забезпечує взаємодію просьюмера і споживача. Інформаційна панель користувацького інтерфейсу, фронтенд якого розроблено з використанням бібліотеки React.JS, забезпечує легкість її використання для проведення операцій з електроенергією. Переказ коштів у формі криптовалюти та контроль гаманця покупця забезпечує смарт-контракт, для розгортання якого використано публічну мережу блокчейну Ethereum. Для зв'язування облікового запису Ethereum з веб-додатком використовується блокчейн-гаманець MetaMask, який використовується для входу користувача та збереження анонімності під час запиту на операцію та забезпечує безпеку гаманця Ethereum за допомогою закритого ключа, автентифікації користувача та секретної фрази. Мережа блокчейн, розгорнута через абонентську мережу інтернет, забезпечує автентичність даних пристроїв інтернету речей за допомогою консенсусного алгоритму та безпечне збереження інформації про торгову діяльність, яка відображається в інтерфейсі користувача.

Ключові слова: P2P-торгівля, інтернет речей, блокчейн, транзакції, веб-інтерфейс користувача, бібліотека React.JS.

A method of interaction between a prosumer and a consumer is proposed to implement a peer-to-peer (P2P) trading mechanism, which is based on the use of blockchain technology and the Internet of Things and provides secure communication for the exchange of electricity and data between participants of the electricity trading platform without involving a third party. Internet of Things technologies are used to monitor electricity production and consumption, transfer information generated by physical-level Internet of Things devices to cloud services and exchange between network nodes. Blockchain technology is used to support communication between Internet of Things devices, ensure data reliability, confidentiality and security of transactions. The user interface of the electricity trading platform web application provides interaction between the prosumer and the consumer. The information panel of the user interface, the front end of which is developed using the React.JS library, ensures its ease of use for conducting electricity transactions. The transfer of funds in the form of cryptocurrency and control of the buyer's wallet is provided by a smart contract, for the deployment of which the public Ethereum blockchain network is used. To link the Ethereum account with the web application, the MetaMask blockchain wallet is used, which is used for user login and maintaining anonymity during the transaction request and ensures the security of the Ethereum wallet using a private key, user authentication and a secret phrase. The blockchain network, deployed over the subscriber Internet network, ensures the authenticity of data from IoT devices using a consensus algorithm and secures information about trading activities that is displayed in the user interface.

Keywords: P2P trading, Internet of Things, blockchain, transactions, web user interface, React.JS library.

Вступ

Декарбонізація, децентралізація та цифровізація є рушійними силами трансформації енергетичного сектору [1]. Зростання кількості відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) та дерегуляція електромережі зумовлює процес децентралізації ринків електроенергії. Просьюмер, який має надлишок електроенергії, може зберігати її за допомогою систем накопичення енергії, експортувати в електромережу, продавати іншим споживачам. Впровадження торгівлі електроенергією між просьюмером та споживачем (P2P торгівлі) без посередника дозволяє обмінюватися електроенергією з ВДЕ у мікромережі, приносить певні вигоди просьюмерам, споживачам та оператору системи розподілу, оскільки полегшує балансування попиту і пропозиції на місцевому рівні. P2P торгівля передбачає розширену комунікацію для обміну

електроенергією та даними. Проте вимагає вирішення питання інформаційної безпеки та конфіденційності, попередження витоку інформації, втрати даних тощо.

Метою роботи є розробити спосіб реалізації P2P торгівлі електроенергією, який би сприяв комунікації для обміну електроенергією та даними, а також безпечній взаємодії просьмюмера і споживача без залучення третьої сторони.

Результати дослідження

Система P2P торгівлі містить фізичний рівень електромереж (фізичну інфраструктуру, яка потрібна мікромережі для забезпечення функції торгівлі енергією) і рівень інформаційно-комунікаційних технологій та контролю. З впровадженням розширеної інфраструктури вимірювання комунальні компанії, споживачі та виробники в розумних електромережах можуть взаємодіяти один з одним за допомогою обліку електроенергії на базі інтелектуальних лічильників із підтримкою двостороннього зв'язку. Розширена інфраструктура вимірювання, яка включає інтелектуальні лічильники, комунікаційні мережі, системи управління даними лічильників та засоби інтеграції зібраних даних у платформи/інтерфейси програмних додатків. Фізичний рівень генерує велику кількість даних, пов'язаних з електроенергією. Для моніторингу виробництва і споживання електроенергії використано технології інтернету речей (IoT). Пристрої IoT, якими в контексті електромережі є інтелектуальні лічильники, збирають дані щодо вимірювання електроенергії та передають дані хмарним службам в Інтернеті. Хмарні сервіси, такі як інтерфейс прикладного програмування (API), надають доступ до даних про споживання та генерацію електроенергії.

Незважаючи на численні переваги розширеної інфраструктури вимірювань, безпечна передача даних між пристроями є складним завданням. Для забезпечення безпеки, конфіденційності та надійності даних, що генеруються пристроями IoT, застосовується технологія блокчейн. Блокчейн - це децентралізований цифровий розподілений реєстр, який безпечно зберігає транзакції мережі однорангових вузлів та використовується для підключення великої кількості анонімних вузлів без необхідності використання центрального керуючого агента. Учасники блокчейну представлені як вузли, які співпрацюють для підтримки даних, що зберігаються в блокчейні, спільного захисту та ведення спільного запису транзакцій або цифрових подій, не покладаючись на будь-яку довірену сторону [1].

Розумні лічильники можуть бути безпосередньо підключені до мережі блокчейн через шлюз. Дані з лічильників містять ідентифікатори лічильників та іншу інформацію, пов'язану з комунальними послугами, відповідно до протоколу IEC 62056 [2]. Всі вузли мережі блокчейн зберігають копію перевірених даних, що гарантує довіру та автентичність інформації IoT. Блокчейн підтримує зв'язок між пристроями IoT, мінаючи центральні сервери та дозволяючи швидше обмінюватися повідомленнями та даними між вузлами. Віртуальний рівень архітектури IoT-блокчейн для P2P-торгівлі енергією в мережі охоплює дані про енергію та транзакції торгівлі енергією, що генеруються пристроями IoT фізичного рівня. Впровадження технології блокчейн в платформу P2P-торгівлі забезпечує незмінні і прозорі записи транзакцій всім учасникам мережі [1, 3]. Автентифікація даних здійснюється за допомогою консенсусного алгоритму, а аналіз транзакцій – за допомогою смарт-контракту (розгорнутого на блокчейні фрагменту комп'ютерного коду, що реалізує виконання певних умов).

Модель P2P торгівлі електроенергією включає сервер IoT для передачі енергії між вузлами, а також публічну мережу блокчейну Ethereum для розгортання смарт-контракту для переказу коштів у формі криптовалюти та контролю гаманця покупця (якщо балансу недостатньо, це не дозволить покупцеві придбати електроенергію). Об'єкти інформації про замовлення та транзакції надсилаються в мережі блокчейн. Мережі блокчейн розгортаються через абонентську мережу інтернет. Блокчейн-гаманець використовується для входу користувача та збереження анонімності під час запиту на операцію. MetaMask забезпечує безпеку гаманця Ethereum за допомогою закритого ключа, автентифікації користувача та секретної фрази [4]. Сервер IoT дозволяє вузлам контролювати та моніторити вироблену енергію. Зв'язок інтелектуального вимірювання надсилається через TSP/IP.

Платформа для P2P-торгівлі енергією на основі Інтернету речей та блокчейну забезпечує взаємодію учасників за допомогою веб-інтерфейсу користувача. Для розробки фронтенду web-додатку використана бібліотека React.JS, що допомагає візуалізації, взаємодіючи з бекендом через API для отримання даних для відображення. Бібліотека JavaScript Web3 була використана як проміжний шар для сприяння комунікації між фронтендом та бекендом децентралізованого додатку (DAPP). MetaMask, гаманець Ethereum, що використовується для зв'язування облікового запису Ethereum з веб-додатком, було встановлено як розширення для Google Chrome. Сервер, на якому розміщено блокчейн Ethereum та інтерфейс користувача на основі React.JS, це віддалений сервер, налаштований для торгової діяльності. Конфігурація користувацького інтерфейсу має інформаційну панель із трьома розділами: торгівля,

гаманець і статистика, посилання для купівлі, продажу, перегляду поточних лістингів та транзакцій, схвалених шляхом майнінгу після завершення передачі потужності, що робить всю систему легкою для використання та розуміння. Веб-сайт дозволяє користувачам входити в систему та отримувати спеціальний ключ для керування. Після входу вони можуть здійснювати операції з електроенергією, такі як запити на купівлю або продаж, передавати енергію, вимірювати передану енергію та здійснювати платежі. Також є опції відмови покупцеві, якщо енергія недоступна для продажу. Вся торгова діяльність в інтерфейсі користувача записується на блокчейн-сервері.

Висновки

Платформа для P2P-торгівлі енергією на основі Інтернету речей та блокчейну забезпечує безпечну комунікацію для обміну електроенергією та даними між учасниками. У P2P-системах блокчейн фіксує транзакції миттєво та автономно, усуваючи потребу в посередниках та надаючи енергетичним трейдерам можливість приймати рішення на основі своїх уподобань. Просьюмери та споживачі можуть вводити свої налаштування через інтерфейс користувача, тоді як інтелектуальні лічильники надають дані про попит на енергію та надлишок енергії. Застосування блокчейну сприяє розвитку безпечної, автономної та надійної цифрової інфраструктури, яка здатна забезпечити координацію підключених до мережі енергетичних активів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Dorokhova M. Blockchain-Supported Framework for Charging Management of Electric Vehicles / Dorokhova M., Vianin J., Alder J.-M., Ballif C., Wyrsch N., Wannier D. A. // *Energies*. – 2021. - №14. – ID7144. <https://doi.org/10.3390/en14217144>
2. Appasani B. Blockchain-Enabled Smart Grid Applications: Architecture, Challenges, and Solutions / Appasani B., Mishra S.K., Jha A.V., Mishra S.K., Enescu F.M., Sorlei I.S., Bîrleanu F.G., Takorabet N., Thounthong P., Bizon N. // *Sustainability*/ - 2022. - 14. - ID 8801. <https://doi.org/10.3390/su14148801>
3. Wang Y. Distributed meter data aggregation framework based on Blockchain and homomorphic encryption. / Wang Y., Luo F., Dong Z., Tong Z., Qiao, Y. // *IET Cyber-Physical Systems: Theory & Applications*. – 2019. - №4. – Pp. 30-37. <https://doi.org/10.1049/iet-cps.2018.5054>
4. Al-Zoubi A. An Interactive IoT-Blockchain System for Big Data Management / Al-Zoubi A., Saadeddin T., Dmour M., Adi L. // 2022 4th IEEE Middle East and North Africa COMMunications Conference (MENACOMM), Amman, Jordan. - 2022. - pp. 71-76. <https://doi.org/10.1109/MENACOMM57252.2022.9998263>.

Давиденко Людмила Валеріївна – д-р техн. наук, професор кафедри електричної інженерії, Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, e-mail: l.davydenko@lutsk-ntu.com.ua

Давиденко Віктор Володимирович – студент групи КНм-21, факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій, Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, e-mail: davydenko.v2211.122.24@lntu.edu.ua

Науковий керівник: *Давиденко Людмила Валеріївна* — д-р техн. наук, професор кафедри електричної інженерії, Луцький національний технічний університет, м. Луцьк

Davydenko Liudmyla V. – Dr. Sc. (Eng.), Professor of Electrical Engineering, Lutsk National Technical University, Lutsk, email : l.davydenko@lutsk-ntu.com.ua

Davydenko Viktor V. — Faculty of Computer Integrated Technologies, Lutsk National Technical University, Lutsk, email : davydenko.v2211.122.24@lntu.edu.ua

Supervisor: *Davydenko Liudmyla V.* – Dr. Sc. (Eng.), Professor of Electrical Engineering, Lutsk National Technical University, Lutsk.

О.В. Соломчак
М.Я. Николайчук
А.О. Соломчак

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КЕРУВАННЯ STATCOM У МЕРЕЖАХ ІЗ СЕС НА ОСНОВІ ІНТЕГРАЦІЇ SIMATIC ENERGY SUITE ТА SENTRON PAC4200

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Анотація Розглянуто підхід до інтеграції платформ SIMATIC Energy Suite і SENTRON PAC4200 у систему керування STATCOM для підвищення якості електроенергії в мережах середньої напруги з підключеними сонячними електростанціями. Запропонована архітектура забезпечує автоматизований моніторинг, аналіз параметрів та адаптивне керування реактивною потужністю, що сприяє стабілізації напруги, зниженню гармонічних спотворень і підвищенню коефіцієнта потужності. Результатом є перехід від реактивного до інтелектуального активного керування якістю електроенергії, заснованого на аналітиці та реальних даних енергомоніторингу.

Ключові слова: електрична мережа середньої напруги, СЕС, якість електроенергії, STATCOM, SIMATIC Energy Suite, SENTRON PAC4200.

ENHANCING STATCOM CONTROL EFFICIENCY IN NETWORKS WITH PV PLANTS BASED ON THE INTEGRATION OF SIMATIC ENERGY SUITE AND SENTRON PAC4200

Abstract The paper presents an approach to integrating the SIMATIC Energy Suite and SENTRON PAC4200 platforms into a STATCOM control system to improve power quality in medium-voltage networks with connected solar power plants. The proposed architecture enables automated monitoring, parameter analysis, and adaptive reactive power control, contributing to voltage stabilization, reduction of harmonic distortions, and enhancement of the power factor. As a result, the system transitions from reactive to intelligent active power quality control based on analytics and real-time energy monitoring data.

Keywords: medium-voltage power network, solar power plant, power quality, STATCOM, SIMATIC Energy Suite, SENTRON PAC4200.

Сучасний розвиток електроенергетики характеризується зростанням частки відновлюваних джерел енергії, зокрема сонячних електростанцій (СЕС), у структурі генеруючих потужностей. Такі джерела, попри їхню екологічну перевагу, призводять до підвищення нестабільності параметрів електричної енергії в мережах середньої напруги, що зумовлено коливаннями вироблення потужності та зміною режимів навантаження. Однією з актуальних задач сучасних систем електропостачання є забезпечення стабільної якості електроенергії шляхом впровадження інтелектуальних систем керування компенсувальними пристроями.

Одним із найбільш ефективних засобів динамічної компенсації реактивної потужності є STATCOM (Static Synchronous Compensator), який забезпечує стабілізацію напруги та зниження рівня гармонік у мережі. Водночас ефективність його роботи значною мірою залежить від точності та швидкодії системи керування, що вимагає впровадження сучасних засобів моніторингу, збору та аналізу енергетичних даних.

Платформи SIMATIC Energy Suite і SENTRON PAC4200 компанії Siemens надають широкі можливості для автоматизованого вимірювання, аналізу та оптимізації енергоспоживання в режимі реального часу. Їх інтеграція у систему керування STATCOM дозволяє створити замкнутий контур керування якістю електроенергії, що базується на об'єктивних даних моніторингу параметрів мережі 35 кВ із підключеною СЕС.

На даному етапі недостатньо рішень з прикладної реалізації інтеграції SIMATIC Energy Suite + SENTRON PAC4200 саме для керування STATCOM у мережах середньої напруги, відсутність єдиних практичних підходів до побудови інтерфейсів обміну даними між рівнем енергомоніторингу та розширеними алгоритмами контролю STATCOM із урахуванням специфіки СЕС; недостатня кількість експериментальних результатів/реал-тайм симуляцій, адаптованих під топології мереж 35 кВ. Ці аспекти

виправдовують дослідницьку цінність роботи, спрямованої на практичну інтеграцію вищезгаданих засобів та оцінку їх впливу на якість електроенергії.

Актуальність дослідження полягає у необхідності розроблення ефективних методів інтеграції інтелектуальних енергетичних платформ у структуру керування компенсувальними пристроями для підвищення надійності та енергоефективності роботи електричних мереж з відновлюваними джерелами енергії.

Метою дослідження є розроблення та аналіз підходу до інтеграції SIMATIC Energy Suite і SENTRON PAC4200 у систему керування STATCOM для покращення якості електроенергії в мережі 35 кВ з підключеною сонячною електростанцією.

Вказана інтеграція може покращити наступні ключові показники ефективності (KPI):

- Стабільність напруги (підтримка $\pm$ допустимого відхилення у точці приєднання).
- Реактивний баланс і коефіцієнт потужності / PF.
- Зниження THD (гармоніки) і flicker.
- Зменшення або пом'якшення віялових просядок/перепадів від СЕС при зміні генерації.
- Підвищення доступності СЕС (менше спрацювань захисту через мережні збурення).

Архітектура та канали зв'язку

1. Прилади SENTRON ставляться: в точці спільного приєднання СЕС (РСС), на стороні трансформатора 35/10 кВ (якщо є відгалуження), та на критичних приєднаннях (шини/фідери). Вони передають дані у SIMATIC через Modbus TCP/RTU або через інші шлюзи (або через промислову мережу).

2. SIMATIC Energy Suite / SCADA / PLC (TIA Portal) отримують дані від SENTRON і формують телеметрію, попередження та правила управління. SIMATIC може виконувати автоматичні скрипти (наприклад, при перевищенні THD або падінні напруги нижче порогу) та посылати команду на контролер STATCOM або на контролер інвертора СЕС.

3. Команди управління STATCOM краще прокладати через IEC 61850 (якщо підстанція його підтримує) або через захищений Modbus/OPC UA/IEC 60870-5-104 до розподільного контролера/RTU/PLC, який управляє STATCOM. Для 35 кВ промислові рішення зазвичай пропонують IEC 61850/Modbus/OPC.

Приклад керуючих стратегій і сценаріїв

1. Автоматичний Volt-VAR (швидкий цикл STATCOM) — STATCOM реагує на відхилення напруги на РСС (швидко генерує/споживає реактивну потужність). Використовується для миттєвої стабілізації. (STATCOM працює у мілі- до секундному часовому масштабі).

2. Volt-Watt / Watt-Priority — при сильних коливаннях напруги можна тимчасово знижувати активну генерацію СЕС (через сигнал інвертору) — повільніший контроль (секунди → хвилини) керований через SIMATIC, щоб уникнути спрацювань захисту. SIMATIC може ініціювати обмеження генерації електроенергії СЕС за правилами.

3. Гармонічне фільтрування / активне очищення — STATCOM із функцією активного фільтра знижує THD; SENTRON моніторить гармоніки і подає сигнали керування на STATCOM/maintenance.

4. Координація раптових подій — SIMATIC зберігає події якості електроенергії (провали напруги, перенапруги, перерви живлення) від SENTRON і автоматично запускає діагностику / налаштування STATCOM (адаптивне регулювання), або повідомляє оператора.

Основна перевага інтеграції SIMATIC Energy Suite + SENTRON + STATCOM у тому, що система переходить із «реактивного» режиму роботи (де STATCOM просто реагує на напругу) до активного керування якістю електроенергії на основі аналітики, даних і прогнозів.

Інтеграція SIMATIC Energy Suite з SENTRON та STATCOM перетворює стандартний пристрій компенсації на активний інструмент керування якістю електроенергії, який одночасно:

- підтримує напругу,
- зменшує гармоніки,
- підвищує коефіцієнт потужності,
- координує роботу інверторів СЕС,
- забезпечує звітність і прогнозування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. SIEMENS. Industrial controls. PAC3200 & PAC4200 for SIMATIC PCS7. URL: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/150/109793150/att_1053688/v1/P7PAC4_b_en-US.pdf (дата звернення: 03.10.2025).

2. SIEMENS. SIMATIC Energy Suite V19.0. URL: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/420/109828420/att_1168483/v2/s7_energy_suite_function_manual_en-US_en-US.pdf (дата звернення: 03.10.2025).
3. SVC PLUS® (STATCOM). URL: <https://www.siemens-energy.com/global/en/home/products-services/product/svcplus.html> (дата звернення: 04.10.2025).

Соломчак Олег Володимирович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електричної інженерії Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, e-mail: oleh.solomchak@nung.edu.ua

Николайчук Микола Ярославович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційно-телекомунікаційних технологій та систем Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, e-mail: mykola.nykolaichuk@nung.edu.ua

Соломчак Антін Олегович, аспірант кафедри інформаційно-телекомунікаційних технологій та систем Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, e-mail: antin.xopcc@gmail.com

ШЛЯХИ ЗМЕНШЕННЯ ВИТРАТ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

Львівський державний університет безпеки життєдіяльності

Анотація

Ринкові умови призвели до суттєвого зростання цін на енергоресурси, що зробило електроенергію ще більш значною статтею витрат у виробництві. Для підприємств із високою енергоємністю її частка у собівартості продукції доходила до 40-45%.

Для аналізу ефективності використання електроенергії у поєднанні з технологічними процесами та контролю реальному навантаженню окремих виробничих ліній підприємствам необхідно мати сучасне обладнання. Застарілі Автоматизовані системи комерційного обліку електроенергії (АСКОЕ) не здатні забезпечити контроль і оптимізацію режимів роботи [1]. Тому підприємства, орієнтовані на прогресивний розвиток, висунули до АСКОЕ жорсткіші вимоги.

Ключові слова

Автоматизовані системи комерційного обліку, режими роботи, автоматизовані системи управління технологічними процесами.

Abstract

Market conditions have led to a significant increase in energy prices, making electricity an even more significant expense in production. For energy-intensive enterprises, its share in the cost of production reached 40-45%.

To analyze the efficiency of electricity use in conjunction with technological processes and control the actual load of individual production lines, enterprises need to have modern equipment. Outdated automated commercial electricity metering systems (ACEMS) are unable to ensure control and optimization of operating modes [1]. Therefore, enterprises focused on progressive development have imposed stricter requirements on ASCOE.

Keywords

Automated commercial metering systems, operating modes, automated process control systems.

Вступ

Сучасні системи АСКОЕ почали активно використовувати мікропроцесорні лічильники та пристрої збирання і передачі даних (ПЗПД), що створені на основі сучасних промислових контролерів. Хоча впровадження мікропроцесорних лічильників стало важливим кроком вперед, головна роль у роботі систем АСКОЕ продовжує належати ПЗПД. Основна увага приділяється комунікаційним характеристикам ПЗПД, які забезпечують ефективну інтеграцію в сучасні АСКОЕ.

Сучасні ПЗПД повинні бути обладнані стандартним набором інтерфейсів для інтеграції в автоматизовані системи управління технологічними процесами (АСУ ТП). Зокрема, вони мають підтримувати: послідовні інтерфейси RS-232, RS-485, ІРПС; локальні мережі Ethernet; бездротові канали зв'язку радіоканал; польові шини ProfiBus, CAN Bus [2].

Завдяки широкому вибору інтерфейсів зв'язку ПЗПД дозволяють створювати адаптовані системи обліку електроенергії, що інтегруються в існуючу інфраструктуру підприємства. Використання стандартних протоколів передачі даних сприяє їхній інтеграції в АСУ ТП.

Крім апаратного оснащення, важливою вимогою є використання стандартних протоколів передачі даних, таких як TCP/IP, PPP, SLIP тощо, що забезпечує універсальність обміну інформацією.

ПЗПД повинні мати можливість одночасного функціонування на кількох каналах зв'язку, працюючи з різними потоками даних. Завдяки модульній архітектурі такі пристрої можна комплектувати лише необхідними елементами, що дозволяє уникнути надмірності й знижує вартість. При цьому вони повинні залишатися максимально надійними, потребуючи мінімального обслуговування, а також підтримувати можливість віддаленої діагностики для швидкого вирішення технічних проблем [3].

Можливості та ефективність роботи ПЗПД можна підвищити як шляхом переходу на більш сучасні моделі пристроїв, так і завдяки додаванню додаткових модулів до контролерів. Ці пристрої широко використовуються на енергетичних об'єктах, промислових підприємствах, а також в інших організаціях, які самостійно проводять розрахунки за електроенергію з постачальниками або споживачами.

Основні функції ПЗПД:

- обробка даних: збирання, обробка, накопичення, зберігання та відображення даних про активну та реактивну енергію, а також потужність.
- агрегація вимірювань: формування групових показників для об'єднання даних лічильників, пов'язаних з конкретними об'єктами.
- тарифікація: облік спожитої енергії відповідно до диференційованих тарифів на основі зон часу.
- середнє навантаження: розрахунок середньої потужності на основі інтервалів усереднення.
- максимальна потужність: визначення пікових значень потужності за задані часові проміжки.
- архівування даних: створення та ведення архівів заданої структури.
- синхронізація часу: забезпечення єдиного системного часу для синхронізації вимірювань.
- контроль лімітів: моніторинг перевищення потужності за двома встановленими межами.
- індикатори енергії: відображення даних про спожиту енергію на дисплеї.
- передача даних: надсилання інформації по фізичних або телефонних каналах зв'язку до кількох центрів збору даних.
- захист інформації: захист вимірюваних даних та метрологічних параметрів від несанкціонованого доступу чи змін.
- діагностика пристрою: контроль працездатності внутрішніх систем ПЗПД [4].

У разі втрати зв'язку між лічильником і ПЗПД, пристрій автоматично відновлює втрачену інформацію. Це робить ПЗПД надійною базою для створення територіально розподілених і ієрархічних АСКОВ [4].

Висновок

Таким чином, ПЗПД виступають універсальним рішенням для впровадження АСКОВ на промислових об'єктах, дозволяючи реалізувати складні системи, ефективно використовуючи наявні ресурси підприємства.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. КОДЕКС комерційного обліку електричної енергії. ЗАТВЕРДЖЕНО Постановою НКРЕКП 14.03.2018 № 311 (у редакції постанови НКРЕКП від 20.03.2020 № 716).
2. Коцар О.В. Автоматизовані системи контролю, обліку та управління енерговикористанням [електронне видання] : навчальний посібник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017.
3. Концепція побудови автоматизованих систем обліку електроенергії в умовах енергоринку України. Затв. спільним наказом Мінпаливенерго, НІСРЕ, Держкоенергозбереження, Держстандарту, Держбуду та Держкомпромполітики України від 17.04.2000р. №32/28/28/276/75/54.
4. Коцар О.В. Розвиток автоматизованих систем комерційного обліку електроенергії в умовах лібералізації ринку електричної енергії України. Технічна електродинаміка. Київ, 2018.

Анна Пасєка – студентка, annapaseka25@gmail.com

Ігор Кравець – доцент, к.т.н., доцент, sidorets760@gmail.com

Anna Paseka – student, annapaseka25@gmail.com

Igor Kravets – associate professor, Ph.D., associate professor, sidorets760@gmail.com

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ УСТАНОВОК ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ

Львівський державний університет безпеки життєдіяльності

Анотація

Ефективне використання електроенергії - головний чинник сталого розвитку промисловості та енергетики України. Значна частка енергоресурсів витрачається саме на роботу електротехнічних установок - електродвигунів, трансформаторів, освітлювальних систем, вентиляційних установок тощо. За даними досліджень, оптимізація їхніх режимів може знизити енергоспоживання на 10–25 % без необхідності модернізації основного обладнання.

Ключові слова

Міжнародне енергетичне агентство, системи автоматизації і моніторингу, інтелектуальні системи керування енергоспоживання.

Abstract

The efficient use of electricity is a key factor in the sustainable development of Ukraine's industry and energy sector. A significant proportion of energy resources is consumed by electrical equipment such as electric motors, transformers, lighting systems, ventilation systems, etc. According to research, optimizing their operating modes can reduce energy consumption by 10–25% without the need to upgrade the main equipment.

Keywords

International Energy Agency, automation and monitoring systems, intelligent energy consumption management systems.

Вступ

Одним із найважливіших напрямів є регулювання навантаження. Робота електродвигунів при оптимальному навантаженні, близькому до номінального, дозволяє уникнути перевитрат енергії. Використання перетворювачів частоти дає можливість плавно регулювати швидкість обертання двигуна залежно від технологічної потреби, що особливо ефективно для насосів і вентиляторів. За даними Міжнародного енергетичного агентства (IEA), до 2040 року світовий попит на енергію зросте на 30%, що підкреслює необхідність розвитку нових джерел енергії, здатних забезпечити цей попит [1].

Компенсація реактивної потужності дозволяє знизити втрати активної енергії в електричних мережах. Застосування фільтрокомпенсуючих пристроїв і статичних компенсаторів стабілізує рівень напруги та підвищує коефіцієнт потужності. Згідно з дослідженнями Кучанського В. В. та Малахатки Д. О., впровадження керованих реакторів і компенсаторів дозволяє скоротити втрати активної потужності до 12 % [1].

Важливим є також використання систем автоматизації та моніторингу. Сучасні системи SCADA, сенсори контролю навантаження й температури дають змогу оптимізувати роботу установок у реальному часі. Ключовими елементами цієї системи є сонячні батареї, які перетворюють сонячну енергію на електричну, що дозволяє забезпечити автономність або зменшити залежність від централізованих мереж [2].

Крім технічних рішень, ефективним напрямом залишається використання відновлюваних генеруючих одиниць для пікового навантаження, які спричиняють значне збільшення вартості системи, оскільки потужність генеруючих одиниць збільшується, а також збільшується потужність системи зберігання. Сонячні панелі, вітрогенератори та системи накопичення енергії можуть частково або повністю забезпечувати автономне живлення окремих установок [3].

Для досягнення максимальної ефективності необхідно впроваджувати інтелектуальні системи керування енергоспоживанням, що використовують алгоритми прогнозування навантаження. Такі технології розробляються в межах сучасних концепцій Smart Grid, які активно впроваджуються в Україні [2].

Висновок

Отже, реалізація цих підходів дозволить зменшити енергоспоживання, продовжити термін служби обладнання та сприятиме екологічній безпеці й економічній стабільності підприємств.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ісаєв М. С. Оптимізація режимів роботи системи енергопостачання на основі використання сонячної енергії: дипломний проєкт. — КПІ ім. І. Сікорського, 2024. — С. 12–18.
2. Кучанський В. В., Малахатка Д. О. Параметрична оптимізація режимів роботи магістральних електричних мереж за критерієм втрат активної потужності // Праці Інституту електродинаміки НАН України. — 2021. — № 59. — С. 72 - 80.
3. Белоха Г. С. Оптимізація техніко-економічних показників локальних систем електроживлення з транзактивним керуванням: монографія. — КПІ ім. І. Сікорського, 2023. — С. 44–56.

Анастасія Сидорець – студентка, sidorets760@gmail.com

Ігор Кравець – доцент, к.т.н., доцент, sidorets760@gmail.com

Anastasia Sidorets – student, sidorets760@gmail.com

Igor Kravets – associate professor, Ph.D., associate professor, sidorets760@gmail.com

Л.Н. Добровольська
Н.Г. Куць
Д.С. Собчук

ГІБРИДНІ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З ВІДНОВЛЮВАЛЬНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ

Луцький національний технічний університет

Анотація

У цій статті розглядаються передумови побудови гібридних розподілених систем, що включають відновлювані джерела енергії. У цьому контексті проведено аналіз існуючих та перспективних структур автономних систем надійного електропостачання з гетерогенними джерелами, що включають відновлювані джерела енергії, особливості їх впливу на систему централізованого електропостачання. Проведено дослідження оптимальних режимів роботи таких гібридних енергосистем та технологічних процесів, які можуть бути застосовані в сільському господарстві та промисловості.

Ключові слова: відновлювані джерела енергії, розподільча електрична мережа, енергетичний сектор

Abstract

This paper considers the prerequisites for building hybrid distributed systems that include renewable energy sources. In this context the analysis of existing and perspective structures of autonomous systems of reliable power supply with heterogeneous sources that included renewable energy sources, the peculiarities of their impact on the system of centralized power supply. We research the optimal modes of such hybrid power systems and technological processes that can be applied in the farm and industry was carried out.

Keywords — renewable energy sources, distribution electrical network, energy sector.

Вступ

В умовах військової агресії та вторгнення на територію України та ведення бойових дій в останні роки, енергетичний сектор України стикається з новими та більш загрозливими викликами, які можуть становити глобальну загрозу. До цих викликів належать ядерний тероризм та закриття атомних електростанцій, масове руйнування інфраструктури, Незважаючи на ці виклики та військову агресію, синхронізація української енергетичної системи з енергетичною системою континентальної Європи триває[1].

Результати дослідження

Впровадження ВДЕ в енергосистемі є основним напрямком розвитку електроенергетики в Україні та інших країнах світу [2]. Одним із шляхів вирішення цієї проблеми може бути використання гібридних розподілених систем з відновлюваними джерелами енергії (ВДЕ). Характерною особливістю використання таких систем є те, що джерелами розподіленої генерації є джерела вищих гармонік в розподільчій електричній мережі, що також було досліджено в роботі. Об'єктом дослідження є проектування такої мережі, яка б забезпечувала надійне постачання якісної електроенергії споживачам. Використовуючи математичне моделювання та результати експериментів, досліджено вплив тривалості відмов на рівень надійності систем H-RES. Але особлива проблема полягає в тому, щоб врахувати залежність графіка генерації ВДЕ від природних умов, жоден з відомих методів не дозволяє це зробити. В даній роботі пропонуються імітаційні методи та натурні експерименти, які дозволяють оцінити вплив ВДЕ на режимну та балансову надійність і мають бути враховані при розрахунках режимів розподільчих електричних мереж. Розробка режимів роботи на основі радіальних потоків потужності призводить до деяких проблем для успішного впровадження. Тому необхідно вирішити проблеми, які збільшать виробництво електроенергії з ВДЕ для підвищення економічної ефективності. Крім того, нам потрібно зменшити втрати електроенергії в розподільних мережах, а також підвищити надійність та якість електроенергії, що постачається споживачам. Особливу увагу слід приділити залежності режиму роботи ВДЕ від природних умов. Наявність розподілених джерел генерації в розподільчих електричних мережах призвела до того, що їх слід розглядати як мережі з двостороннім живленням або LES. Тому, щоб оцінити

необхідну представлену потужність джерел РДЕ, нам потрібно проаналізувати розподіл потоків потужності в ЛЕС. [4]

Для перевірки ефективності розробленого методу ми розглядаємо реальні вузли для підключення що стосуються певних технічних умов. Відповідно до критерію втрат електричної енергії, щоб вибрати оптимальний, ми визначаємо коефіцієнти розподілу струмів для кожного з варіантів.

Висновки

Результат дозволяє оцінити вплив відновлюваних джерел енергії на функціональну готовність розподільних електричних мереж. Аналіз результатів оцінки функціональних можливостей реально існуючої гібридної мережі показав адекватність запропонованої моделі показника якості функціонування, яка може бути використана для вирішення проектних задач:

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] I. Liadze, C. Macchiarelli, P. Mortimer, P. Sanchez Juanino. Economic Costs of the Russia-Ukraine War. The World Economy, no.46(4), pp. 874-886, 2023.

[2] E. Orhan. The effects of the Russia-Ukraine war on global trade. Journal of International Trade, Logistics and Law, no. 8(1), pp. 141- 146, 2022.

[3] D.Jarykbassov, P. Lezhniuk, I.Hunko; V. Lysyi, L. Dobrovolska . Macromodeling of Local Power Supply System Balance Forecasting Using Fractal Properties of Load and Generation Schedules. Informatyka, Automatyka, Pomiar w Gospodarce i Ochronie Środowiska. 2023-09-30, Journal article

DOI: 10.35784/iapgos.4457. URL: <https://doi.org/10.35784/iapgos.4457>

[4] Lezhniuk P., Komar V., Hunko I., Jarykbassov D., Tussupzhanova D., Yeraliyeva B., & Katayev N. (2022). Natural-simulation Model of Photovoltaic Station Generation in Process of Electricity Balancing in Electrical Power System // Informatyka, Automatyka, Pomiar W Gospodarce I Ochronie Środowiska, 12(3), 40-45

Добровольська Любов Наумівна — канд. техн. наук, професор кафедри електричної інженерії, Луцький національний технічний університет.

Куць Надія Григорівна — канд. техн. наук, доцент кафедри автомобілів і транспортних технологій, Луцький національний технічний університет.

Собчук Дмитро Сергійович — канд. техн. наук, доцент кафедри електричної інженерії, Луцький національний технічний університет.

Dobrovolska Liubov N. — Cand. Sc. (Eng), Professor of Electrical Engineering, Lutsk National Technical University, Lutsk

Kuts Nadia G. — Cand. Sc. (Eng), Assistant Professor of, cars and transportation technologies
Lutsk National Technical University, Lutsk

Sobchuk Dmitro S. — Cand. Sc. (Eng), Assistant Professor of Electrical Engineering, Lutsk National Technical University, Lutsk

ЗАКОНОМІРНОСТІ КЕРУВАННЯ STATCOM ЗА ЗМІНИ ПОТУЖНОСТІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ

¹ Вінницький національний технічний університет;

Анотація

Встановлено закономірність керування STATCOM, що приєднаний до вузла з навантаженням та фотоелектричною станцією, яка дозволяє суттєво знизити відхилення напруги у вузлі навантаження за умови стабільної напруги джерела живлення.

Ключові слова: STATCOM, фотоелектрична станція, відхилення напруги.

Abstract

A control pattern for a STATCOM connected to a node with a load and a photovoltaic station has been established, which allows significantly reducing voltage deviations in the load node at the stable power source voltage condition.

Keywords: STATCOM, photovoltaic station, voltage deviation.

Вступ

Одним з показників якості напруги є її відхилення, яке, відповідно до діючих стандартів [1,2] не повинно перевищувати 5-10%. Вплив відхилення напруги на роботу електроприймачі (електропривод, освітлення та ін.) описано в багатьох науково-технічних літературних джерелах. Для стабілізації рівня напруги у вузлах приєднання навантаження використовуються численні засоби, серед яких ефективним є статичний синхронний компенсатор, або STATCOM [3]. На теперішній час в електричних мережах функціонує велика кількість фотоелектричних станцій (ФЕС), які характеризуються зміною генерації активної потужності в залежності від таких факторів, як погодні умови та ін.

Метою роботи є виявлення закономірностей, які виникають під час роботи STATCOM у вузлах приєднання споживачів та фотоелектричних станцій.

Результати дослідження

Дослідження проведене для такого випадку, коли напруга джерела живлення є стабільною (10,5 кВ), навантаження споживача становить $0,6+j0,4$ МВА, а фотоелектрична станція генерує активну потужність в діапазоні 200 – 500 кВт (рис. 1).

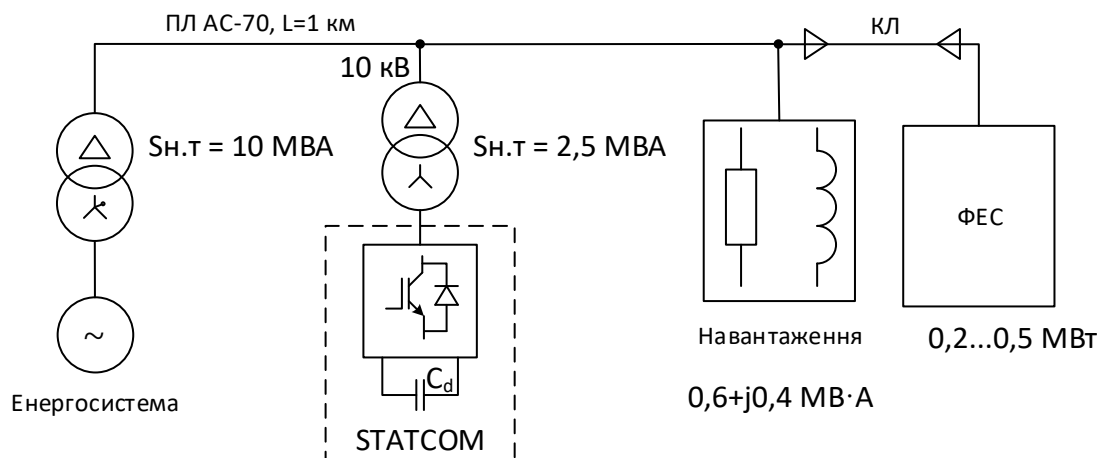


Рис. 1. Розрахункова схема електричної мережі із STATCOM

Здійснено моделювання процесу регулювання STATCOM, що приєднаний до вузла із навантаженням та фотоелектричною станцією. Розглянуто випадки зміни напруги у вузлі приєднання споживача до мережі за наявності і відсутності STATCOM. Результати наведено на рис. 2.

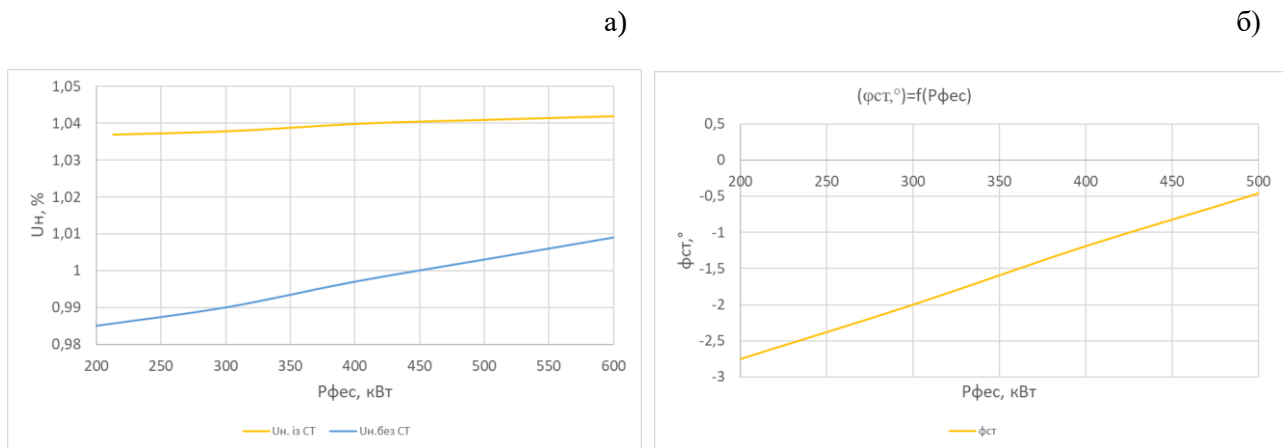


Рис. 2. Зміни напруги у вузлі навантаження за наявності і відсутності STATCOM (а), характер зміни кута регулювання STATCOM (б)

Результати дослідження показали, що за стабільної напруги джерела живлення, генерації активної потужності ФЕС в діапазоні від 200 до 500 кВт, напруга у вузлі приєднання споживача за відсутності STATCOM змінюється в діапазоні до 240 В, що становить 2,4% від номінальної напруги. За умови наявності STATCOM, який працює в режимі забезпечення постійного модуля та регульованого кута ЕРС, напруга у вузлі приєднання споживача змінюється в діапазоні до 50 В, що становить 0,5% від номінальної напруги (рис. 2а). З рис. 2 б видно, що діапазон регулювання кута ЕРС STATCOM лежить в межах від 0 до -3 градуси. При цьому генерується реактивна потужність, що змінюється в діапазоні від 300 до 500 кВАр (рис. 3), а активна потужність практично дорівнює нулю.

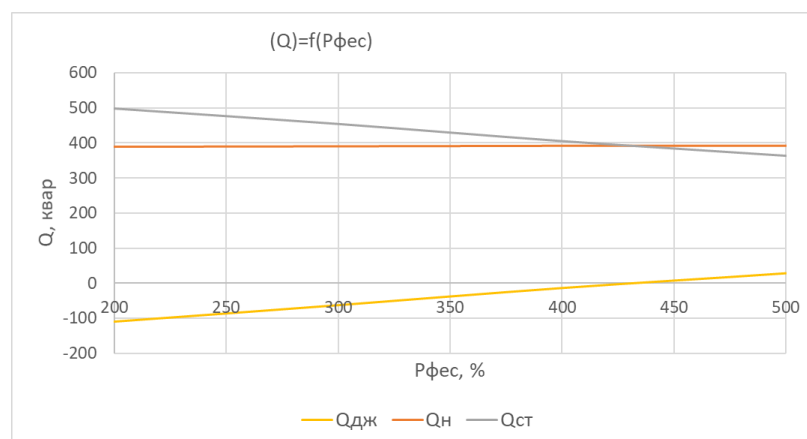


Рис. 3. Генерація реактивної потужності STATCOM у вузлі приєднання ФЕС і навантаження

Таким чином, за умови незмінної напруги джерела живлення і змінної генерації активної потужності ФЕС ефективним є використовувати STATCOM з системою керування, яка забезпечує регулювання кута ЕРС за незмінного її модуля. Інформативними параметрами для системи керування є параметри системи, напруга джерела та потужність, що генерується ФЕС.

Висновки

Проаналізовано роботу STATCOM, що приєднаний до вузла навантаження і фотоелектричної станції. Встановлено, що STATCOM забезпечує зниження відхилення напруги з 2,4 до 0,5 % від номінального значення. За умови стабільної напруги джерела живлення і змінної генерації активної потужності від ФЕС встановлено таку закономірність, за якої для зниження відхилення напруги у вузлі приєднання навантаження достатньо здійснювати регулювання кута ЕРС на виході STATCOM.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. ГОСТ 13109-97. Електрична енергія. Сумісність технічних засобів електромагнітна. Норми якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення. [Чинний від 2000-01-01], 1999. 37 с.
2. ДСТУ EN 50160:2023. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності (EN 50160:2022, IDT). [Чинний від 2023-12-08], 2023. 54 с.
3. Бурбело М., Бабенко О., Лебедь Д. Аналіз процесу керування STATCOM за швидких змін напруги. Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. Кременчук, 2025. Випуск 1 (150). С. 284–291.

Бабенко Олексій Вікторович — канд. техн. наук, доцент кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту, Вінницький національний технічний університет

Babenko Oleksii V. — Department of Electrical Engineering Systems of Electricity Consumption and Energy Management, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail : oleksij_babenko@ukr.net

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ СИЛОВОГО ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ПІДСТАНЦІЙ

¹ Вінницький національний технічний університет;

Анотація

Підвищено точність оцінки ресурсу електрообладнання, що передбачає врахування параметрів фактичного стану, умов експлуатації та дозволяє обчислити фактичний спрацьований ресурс і порівняти з нормативним залишковим ресурсом.

Ключові слова: надійність, експлуатація електрообладнання, залишковий ресурс.

Abstract

Increased accuracy of power equipment resource estimation, which involves taking into account the parameters of the actual state and operating conditions, and allows for the calculation of the actual depleted resource and comparison with the regulatory residual resource.

Keywords: reliability, operation of electrical equipment, residual resource.

Вступ

Найбільш поширеним підходом є індивідуальне прогнозування ресурсу для конкретного електрообладнання. Він вимагає інвестицій у діагностичне обладнання, випробування та програмні засоби для математичного моделювання і аналізу даних. Складність прогнозування здебільшого зводиться до правильного формування алгоритму та опису математичної моделі, яка б точно відображала залишковий ресурс.

Метою роботи є підвищення надійності роботи силового електрообладнання підстанцій, шляхом вдосконалення методики визначення залишкового ресурсу.

Результати дослідження

З метою формування алгоритму та опису моделі прогнозування доцільно застосувати коефіцієнт відносної оцінки технічного стану по визначальному параметру

$$K_i = 1 - \left((P_i - P_{vi}) / (P_i - P_{gi}) \right),$$

де P_i , P_{vi} , P_{gi} – відповідно початкове, вимірне і граничне значення визначального параметра.

Технічний стан електрообладнання описується шкалою від 1 (новий/справний) до 0 (аварійний/граничний). В умовах реальної експлуатації деградація обладнання характеризується багатьма параметрами. Тому для коректного визначення загального стану необхідно застосовувати принцип "найслабшої ланки": за технічний стан приймається найменший коефіцієнт відносної оцінки, який відповідає параметру, що критично наблизився до свого граничного рівня.

Таким чином, для наближеної оцінки залишкового ресурсу

$$T_z = T_n (K_i - K_{min});$$

де T_n – нормативний термін експлуатації обладнання; K_i – відносний коефіцієнт оцінки залишкового ресурсу; K_{min} – мінімально допустимий коефіцієнт оцінки залишкового ресурсу.

Середню швидкість зміни ключового діагностичного параметра обладнання трансформаторної підстанції (ТП) протягом усього періоду експлуатації можна розрахувати як

$$V_s = (P_i - P_{vi}) / T,$$

де T – час напрацювання від початку експлуатації до моменту вимірювання.

Зважаючи на те, що спрацювання ресурсу силового електрообладнання, за статистичними даними, відбувається за експоненціальним законом, ми можемо записати, що

$$T_z = T_n \exp(-V_s t).$$

У відносних одиницях

$$T_z^* = T_z/T_n = \exp(-V_s t).$$

Оскільки в процесі експлуатації технічний стан силового електрообладнання залежить від багатьох різноманітних чинників ΔP_i , зміна кожного з яких впливає на фактичний ресурс, цей ресурс для n експлуатаційних чинників може бути визначений як:

$$T_f^* = D \exp(-V_s \frac{K_i-1}{\Delta P_i}) = e^{\sum_{i=1}^n -V_s \frac{K_i-1}{\Delta P_i}}.$$

Оскільки ця залежність лише якісно описує тренд зміни ресурсу, точне прогнозування вимагає експериментального чи статистичного визначення параметрів V_s та ΔP_i . Якщо відомий уже витрачений ресурс $T_{sr.sp}^*$ електрообладнання ТП, нормативний залишковий ресурс може бути визначений за умови збереження нормативних експлуатаційних режимів як

$$T_{nz}^* = 1 - T_{sr.sp}^*.$$

Висновки

Оцінка ресурсу електрообладнання енергосистеми за цією методикою базується на врахуванні параметрів фактичного ресурсу спрацювання, умов експлуатації, коефіцієнта спрацьованого ресурсу та величини зміни ключового фактора ΔP_i і визначального параметра V_s . Такий підхід дає можливість розрахувати фактичний спрацьований ресурс T_f^* і нормативний залишковий T_{nz}^* ресурси для різних видів обладнання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Діагностика стану електротехнічного обладнання: Курс лекцій [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», освітньо-професійних програм «Електротехнічні пристрої та електротехнологічні комплекси» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: О. Р. Проценко Я. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 162 с.
2. Bardyk E., Bondarenko O. Assessment of regime reliability of electric power system based on the definition of risk index in case of failure of the load with responsible consumers. Technical science and technologies. 2019. Vol. 2(16). P. 105–117.
3. Review on Risk Assessment of Power System / Shiwen Y., Hui H., Chengzhi W., Hao G., Hao F. // Procedia Computer Science. 2017. Vol. 109. P. 1200–1205. doi: 10.1016/j.procs.2017.05.399.

Кутіна Марина Василівна – канд. технічн. наук, доцент кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту, e-mail: mkytina@gmail.com.

Руденко Олександр Іванович – студент групи ЕМ-24м кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту, e-mail: rudoj@gmail.com.

Дяченко Артем Віталійович – студент групи ЕСЕ-24м кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту, e-mail: dartv@gmail.com.

Kutina Marina Vasylivna – Candidate of Science, docent in Department of Electrical Systems of Power Consumption and Energy Management, e-mail: mkytina@gmail.com.

Rudenko Oleksandr Ivanovych – student of group EM-24m of the Department of Electrical Systems of Power Consumption and Energy Management, e-mail: rudoj@gmail.com.

Diachenko Artem Vitaliyovych – student of group ESE-24m of the Department of Electrical Systems of Power Consumption and Energy Management, e-mail: dartv@gmail.com.

СИСТЕМА SMART GRID ЯК ІНСТРУМЕНТ УПРАВЛІННЯ ПРИ ІНТЕГРАЦІЇ ТА ПАРАЛЕЛЬНІЙ РОБОТІ ВДЕ І УЗЕ З РОЗПОДІЛЬЧОЮ МЕРЕЖЕЮ

¹ Вінницький національний технічний університет;

Анотація

Проведено аналіз системи Smart grid, який вказує, що дана система є перспективним інструментом управління для інтеграції та координації роботи відновлювальних джерел енергії і установок зберігання енергії в розподільчих мережах.

Ключові слова: Smart grid, відновлювальні джерела енергії, установки зберігання енергії.

Abstract

An analysis of the Smart Grid system has been conducted, indicating that this system is a promising management tool for integrating and coordinating the operation of renewable energy sources and energy storage facilities in distribution networks.

Keywords: Smart grid, renewable energy sources, energy storage facilities.

Вступ

Система Smart Grid, або інтелектуальна енергомережа, представляє сучасну технологічну концепцію, спрямовану на управління електроенергетичними системами. Її ключовим завданням є інтеграція, координація та забезпечення ефективної взаємодії між відновлюваними джерелами енергії (ВДЕ) і традиційними установками зберігання енергії (УЗЕ) у складі розподільчих мереж.

Метою роботи є обґрунтування ефективності використання системи Smart Grid для інтеграції та координації роботи ВДЕ і УЗЕ в розподільчих мережах.

Результати дослідження

Основні аспекти оптимізації реактивних потоків у лініях радіальної мережі низки включають [1-3]:

Концептуальна архітектура:

- Об'єднання таких рівнів, як датчики та вимірювання, автоматичні контролери, аналітична система управління і комунікаційна інфраструктура (IoT, SCADA).

- Підсистеми — автоматизація розподілу електроенергії, система реагування на попит (Demand Response), енергетичні накопичувачі (ESS) та мікромережі (Microgrid).

Функції управління:

- Забезпечення балансу між генерацією та споживанням у реальному часі.
- Підтримка якості енергопостачання, включно з корекцією напруги, стабілізацією частоти та управлінням реактивною потужністю.

- Прогнозування виробітку ВДЕ на основі погодних даних із адаптивним коригуванням.

- Двосторонній облік і стимулювання споживачів завдяки тарифам із змінним навантаженням.

- Захист від аварій та функція самовідновлення мережі.

Технічні виклики:

- Нестабільність і непередбачуваність у виробництві енергії від ВДЕ, що створює труднощі для навантаження мережі.

- Інтеграція резервних енергетичних накопичувачів для компенсації змінності виробітку.

- Забезпечення кібербезпеки та протидія потенційним загрозам.

- Гармонізація Smart Grid із наявною інфраструктурою та відповідність стандартам комунікацій.

Економічні та регуляторні аспекти:

- Значні фінансові витрати на модернізацію існуючих систем та впровадження технологій Smart Grid.

- Необхідність стимулюючих заходів, субсидій, нових бізнес-моделей і продуманої тарифної політики.
- Юридичне регулювання взаємодії з приватними виробниками енергії (малими ВДЕ), а також доступ до мереж для різних користувачів.

Перспективи розвитку:

- Застосування алгоритмів штучного інтелекту та машинного навчання для підвищення ефективності системи.
- Створення енергонезалежних мікромереж з можливістю автономної роботи.
- Розширення використання нових ресурсів — електромобілів, систем V2G (vehicle-to-grid) та гібридних рішень із накопичувачами енергії.
- Удосконалення заходів кіберзахисту для загальної надійності системи.

Висновки

В результаті аналізу встановлено, що система Smart Grid є перспективним інструментом управління для інтеграції та координації роботи ВДЕ і УЗЕ в розподільчих мережах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. “Smart grids and renewable energy systems” URL: <https://surl.lu/tehzzyr> (дата звернення: 09.10.2025).
2. “Integration of smart grid with renewable energy sources” URL: <https://surli.cc/bygkxw> (дата звернення: 08.10.2025).
3. “A comprehensive review of recent developments in smart grid” URL : <https://surl.li/smnohg> (дата звернення: 06.10.2025).

Гуцал Владислав Сергійович — студент групи ЕЕ-246, факультет електроенергетики та електромеханіки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: chipsikplayyt@gmail.com

Бабенко Олексій Вікторович — канд. техн. наук, доцент кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту, Вінницький національний технічний університет

Захаров Василь Володимирович — асистент кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту, Вінницький національний технічний університет

Науковий керівник: **Бабенко Олексій Вікторович** — канд. техн. наук, доцент кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

Hutsal Vladyslav S. — Department of Building Heating and Gas Supply, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, email : Ivanov@sens.ua

Babenko Oleksii V. — Department of Electrical Engineering Systems of Electricity Consumption and Energy Management, Vinnytsia National Technical University

Zakharov Vasyl V. – Senior Lecturer of electrical power consumption and power management, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia

Supervisor: **Babenko Oleksii V.** — Department of Electrical Engineering Systems of Electricity Consumption and Energy Management, Vinnytsia National Technical University

ДВОСТОРОННІ СОНЯЧНІ ПАНЕЛІ – ПЕРЕВАГИ ВИКОРИСТАННЯ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Проведено аналіз ефективності використання двосторонніх сонячних панелей.

Ключові слова: ефективність, двостороння сонячна панель, довговічність, надійність.

Abstract

An analysis of the efficiency of using double-sided solar panels was conducted.

Keywords: efficiency, double-sided solar panel, durability, reliability.

Вступ

Ефективність та довговічність сонячної електростанції значною мірою залежить від правильно підбраного обладнання. Серед ключових компонентів, що визначають роботу системи, можна виділити сонячні панелі та інвертори. При виборі сонячних панелей та інверторів необхідно враховувати ряд важливих факторів. До них відносяться:

- ефективність: ККД панелей та інвертора безпосередньо впливає на кількість виробленої електроенергії;
- надійність: якісні компоненти забезпечують довготривалу безперебійну роботу системи;
- гарантійні зобов'язання: виробники якісного обладнання надають тривалі гарантії на свої вироби;
- вартість: вартість обладнання є важливим фактором при прийнятті рішення, проте не варто економити на якості;
- сумісність компонентів: всі компоненти системи повинні бути сумісні між собою для забезпечення оптимальної роботи.

Правильний вибір сонячних панелей та інверторів є одним з найважливіших етапів при створенні сонячної електростанції. Від їх характеристик та взаємодії залежить ефективність та економічна доцільність всієї системи. При виборі обладнання необхідно враховувати не тільки технічні характеристики, але й умови експлуатації, бюджет проекту та інші фактори.

Двосторонні сонячні панелі є інноваційною технологією енергії, що дозволяє генерувати з обох сторін модуля, використовуючи як пряме, так і відбите світло. Це значно перевищує їхню продуктивність в порівнянні із односторонніми панелями.

Завдяки вищому коефіцієнту корисної дії та універсальності в умовах різних типів установ, такі панелі стають перспективними рішеннями для підвищення ефективності сонячної енергетики. Дослідження спрямовані на оцінку їхньої продуктивності, економічної перспективи та доцільності впровадження в умовах сучасного енергетичного ринку.

Результати дослідження

Проведені дослідження показали три основні переваги панелей, а саме: висока ефективність, довгий термін служби, висока продуктивність при недостатній освітленості. Давайте розглянемо більш детально.

Висока ефективність. Монокристалічні сонячні панелі є одним з найбільш технологічно досконалих і ефективних видів фотомодулів на ринку. Коефіцієнт корисної дії (ККД) перевищує 20%. Цей високий показник досягається за рахунок використання монокристалічного кремнію, який має однорідну структуру без домішок і дефектів.

Високий ККД дозволяє таким панелям генерувати більше електроенергії з однієї площі відповідно до полікристалічних чи аморфних аналогів. Це особливо важливо для установок у місцях із обмеженим простором, наприклад, на дахах будинків або промислових об'єктів. Крім того, монокристалічні панелі відзначаються стабільною ефективністю навіть за тривалого використання, що забезпечує надійність їх роботи.

Довгий термін служби. Однією з головних переваг монокристалічних сонячних панелей є їхня довговічність. Завдяки використанню високоякісних матеріалів, таких як монокристалічний кремній, ці

панелі мають тривалий термін служби – понад 25 років. Це досягається за рахунок їх стійкості до механічних навантажень, впливу ультрафіолетового випромінювання, зміни температури та інших несприятливих погодних умов.

Висока продуктивність при недостатній освітленості. Монокристалічні сонячні панелі здатні ефективно працювати за умов недостатньої освітленості, наприклад, у хмарну погоду, під час сходу чи заходу сонця. Це досягається за рахунок використання прозорої задньої сторони, яка дозволяє панелям вловлювати розсіяне світло, та високоякісним кремнієвим елементам із покращеними характеристиками.

Ці властивості роблять панелі надзвичайно універсальними, оскільки вони забезпечують стабільне енергопостачання в різних кліматичних умовах, включаючи регіони з частими змінами погоди. Порівняно з полікристалічними аналогами, монокристалічні панелі мають вищі показники продуктивності за рахунок однорідної структурної кремнію, яка мінімізує втрати енергії та забезпечує краще перетворення навіть слабого випромінювання

Ця здатність дозволяє ефективно використовувати монокристалічні панелі не лише для комерційних і промислових установ, але й у побутових умовах, де важливе значення має стабільну генерацію енергії незалежно від погоди чи часу отримання.

Висновок

Монокристалічні сонячні панелі поєднують ефективність, високу довговічність і продуктивність, забезпечуючи оптимальне рішення для генерації чистої енергії в будь-яких умовах. Їхня здатність працювати за слабого освітлення, тривалий термін служби та висока продуктивність роблять їх ідеальним вибором як для домашнього, так і для промислового використання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Сонячна панель двостороння монокристалічна. Веб-сайт. URL: <https://logicpower.ua/ua/dvuhstoronnie-solnechnye-paneli/solnechnaya-panel-dvuhstoronnyaya-monokristallicheskaya-lp-longi-solar-half-cell-580w-30-profil-topcon-n-type-bi-facial> (дата звернення: 16.09.2025).
2. Двосторонні сонячні панелі – майбутнє галузі зеленої енергетики. Веб-сайт. URL: https://sun-energy.com.ua/articles/dvostoronni_sonyachni_paneli?srsId=AfmBOopamj6fi8ftVn7m-J9gjR-y4XMjkjNejHmd6NfFRm4XQBnBk9Lq (дата звернення: 16.09.2025).

Шулє Юлія Андріївна – кандидат технічних наук, доцент кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту Вінницького національного технічного університету, м. Вінниця, e-mail: shulleye.y.a@vntu.edu.ua.

Shulle Yuliya – Cand. Sc. (Eng), Assistan Professor of the department of electrical systems of power consumption and energy management, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: shulleye.y.a@vntu.edu.ua.

ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ВИКЛИКИ ТА ВЛАСТИВОСТІ УСТАНОВОК ЗБЕРЕЖЕННЯ ЕНЕРГІЇ В УКРАЇНІ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі розглядаються сучасні виклики, що стоять перед електричними мережами України, у контексті інтеграції установок зберігання енергії (УЗЕ). Проаналізовано експлуатаційні властивості установок, що забезпечують підвищення стійкості, гнучкості та надійності енергосистеми. Представлено результати досліджень із оптимізації розміщення та параметрів УЗЕ у мережах різних рівнів, а також їх економічний і технічний вплив. Обґрунтовано перспективи розвитку енергетичної інфраструктури із використанням сучасних накопичувачів енергії, що сприяють підвищенню енергетичної безпеки та автономності України.

Ключові слова: електрична мережа, установки зберігання енергії, оптимізація, експлуатаційні властивості, стійкість енергосистеми, енергетична безпека, відновлювані джерела енергії, накопичувачі енергії.

Abstract

The article considers the current challenges facing the electricity networks of Ukraine in the context of the integration of energy storage facilities (ESF). The operational properties of the facilities are analyzed, which ensure increased stability, flexibility and reliability of the power system. The results of research on optimizing the placement and parameters of ESF in networks of different levels are presented, as well as their economic and technical impact. The prospects for the development of energy infrastructure using modern energy storage facilities that contribute to increasing the energy security and autonomy of Ukraine are substantiated.

Keywords: electrical grid, energy storage installations, optimization, operational properties, energy system stability, energy security, renewable energy sources, energy storage devices.

На сучасному етапі розвитку енергетики України питання стійкості, автономності та здатності адаптації електричних мереж до впливу зовнішніх факторів вийшли на перший план. Інфраструктурні виклики, пов'язані з руйнуваннями під час воєнних дій, зростанням частки ВДЕ, а також переходом до децентралізованих моделей споживання й виробництва енергії змушують енергетичну галузь країни брати на озброєння сучасні рішення. Одним із найдієвіших напрямів є розвиток установок зберігання енергії (УЗЕ) у схемах розподільних мереж [1].

Системи зберігання енергії сьогодні виступають технологічною, стратегічною й економічною відповіддю на головні виклики часу. Встановлення УЗЕ дозволяє акумулювати надлишкову електроенергію в години мінімального навантаження, а потім використовувати її у пікові періоди чи у разі надзвичайних ситуацій чи відключень. Це сприяє згладжуванню добових і сезонних коливань у роботі мереж, мінімізує втрати енергії, подовжує ресурс обладнання, а в українських умовах — ще й підвищує енергетичну безпеку громад, підприємств та критичних об'єктів [1][2].

Технічний розвиток електричних мереж нині пов'язується не лише з модернізацією традиційних ліній та обладнання — найважливішою залишається здатність енергосистеми швидко і гнучко реагувати на зміну балансу виробництва і споживання, аварії, сплески навантажень. Встановлення сучасних УЗЕ допомагає вирішити ці завдання за рахунок високої швидкості переходу у різні режими, автоматизованих систем моніторингу, діагностики й прогнозування. Системи зберігання, інтегровані в мережу, фактично стають інтелектуальними вузлами, здатними виконувати функцію аварійного резервування та балансування. Провідні дослідження та практика енергетичних операторів показують, що обґрунтований вибір потужності, типу та місця підключення накопичувача дозволяє не лише покращити якість електропостачання, а й істотно підвищити економічну рентабельність проекту. Зокрема, у розрахунках для українських мереж із застосуванням електрохімічних УЗЕ (такі як для АТ «Вінницяобленерго») впровадження систем зберігання дає змогу скоротити втрати, оптимізувати фінансові потоки операторів та підвищити стійкість мережі до зовнішніх загроз [2][3].

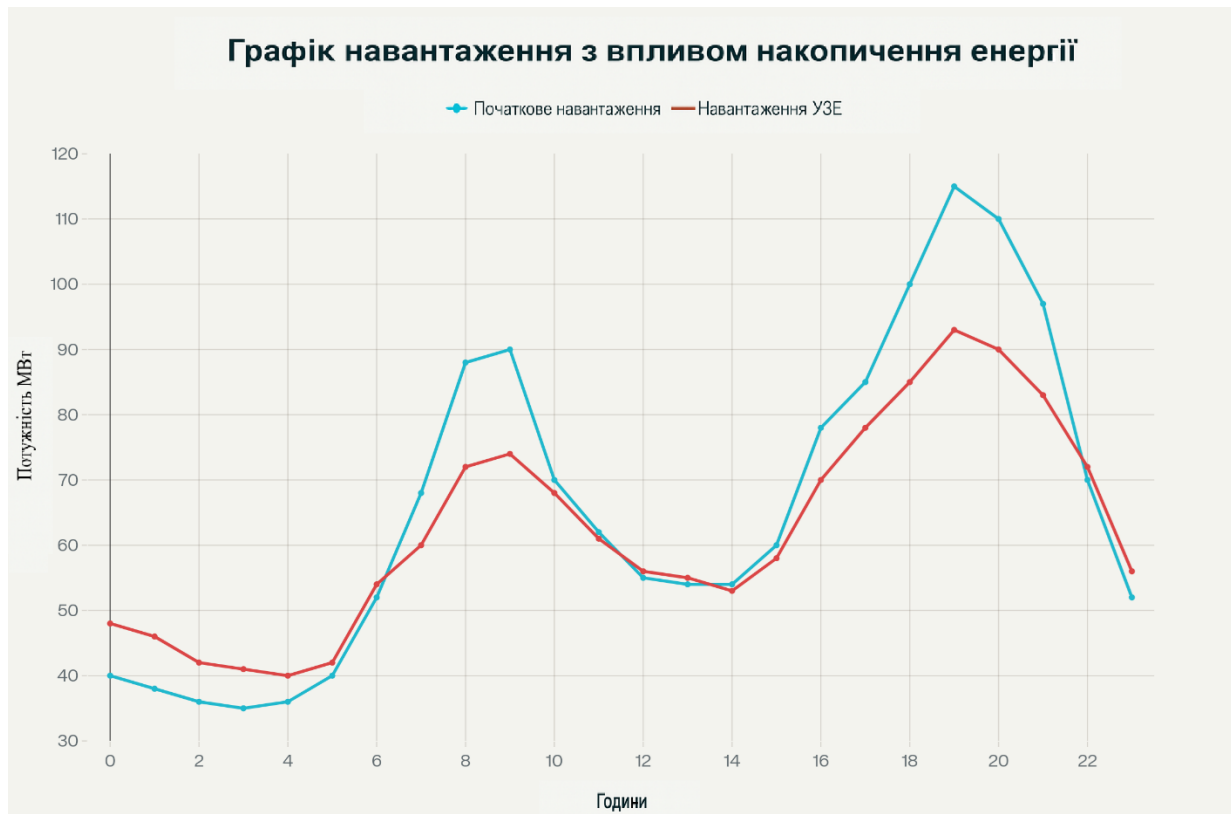
Ключовим елементом сучасних методик оптимізації роботи електричних мереж є використання мультикритеріальних моделей для визначення місць приєднання, потужності та енергоємності систем зберігання. Формально задача максимуму економічного ефекту записується як:

$$E(X) = Pr(X) - Ar(X) - K(X) \rightarrow \max \quad (1)$$

де $E(X)$ – економічний ефект, або функція цільової ефективності системи зберігання енергії, $Pr(X)$ – очікуваний прибуток від роботи системи накопичення, $K(X)$ – інвестиційні витрати, $Ar(X)$ – амортизаційні відрахування, X – сукупність параметрів (ємність, потужність, місце підключення).

Додатково топологію електричних мереж застосовують у вигляді R-схеми, а оптимум знаходять за допомогою числового мінімуму втрат. Таке поєднання економічних і технічних факторів дозволяє отримати практичний результат для конкретних енергосистем з урахуванням усіх технологічних і ринкових особливостей [4].

Графічно ефект роботи УЗЕ можна ілюструвати добовим графіком зміни навантаження і впливу системи зберігання:



Графік показує: у години низького попиту підвищується загальний ККД системи, накопичувачі заряджаються й стабілізують режим, а у вечірній або ранковий пік – віддають енергію, зменшуючи максимальні навантаження на мережі.

За економічними розрахунками для українських мереж, впровадження накопичувачів ємністю від 4 до 40 МВт·год дозволило скоротити втрати на 0,1–1,1%, а економічний ефект від комплексного впровадження досягає понад 1,7 млн \$/рік, термін окупності – від 4,5 до 5,5 років для великих проєктів на типових українських підстанціях.

Загалом міжнародна і національна практика переконують: майбутнє за децентралізованою моделлю мереж із високим рівнем гнучкості, цифровізації й інтеграції накопичувачів. Україна вже йде цим шляхом — реалізуються муніципальні мікромережі, аграрні та промислові об'єкти, «енергетичні кооперативи», пілотні проєкти в обласних центрах.

Підсумовуючи, розвиток електричних мереж із урахуванням сучасних викликів та масовим застосуванням установок зберігання енергії стане основою надійності, стійкості та енергетичної незалежності України в нових реаліях. Державна підтримка, модернізована нормативна база і якісна інженерна експертиза дозволять масштабувати успішні практики по всій країні. [3, 4]

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Збірник тез наукових робіт // Електроенергетика та електротехніка. – Харків: НТУ «ХПІ», 2018. Режим доступу: <http://web.kpi.kharkov.ua/ees/wp-content/uploads/sites/231/2021/11/Zbirnyk-tez-EES-2018.pdf>
- [2] Збірник тез за матеріалами науково-технічних конференцій. – Кропивницький: КНТУ, 2020. Режим доступу:

<https://kntu.kr.ua/file/content/13789/zbirnyk-tez.pdf>

[3] Міністерство енергетики України. Звіт про розвиток сектору установок зберігання енергії в Україні. 2025. С. 7–14. Режим доступу:

https://mev.gov.ua/sites/default/files/2025-08/bess-report-ukraine-v3-18.08.2025_0.pdf

[4] Оптимізація інтегрування електрохімічних накопичувачів енергії для підвищення енергоефективності розподільних електромереж. Вісник Вінницького політехнічного інституту, 2025, №3. Режим доступу

<https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/49075/185367.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

Самсонюк Денис Юрійович — студент групи ЕСМ-24м, факультет електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: samsonukdinis@gmail.com

Сікорська Олена Вікторівна — кандидат технічних наук, доцент, факультет електроенергетики та електромеханіки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: olenasikorska@ukr.net

Samsoniuk Denys Y. — Department of electrical plants and systems, , Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, email : samsonukdinis@gmail.com

Sikorska Olena - Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Vinnitsa National Technical University, associate professor of power plants and systems department; Vinnitsa, Ukraine

ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ ТА СТІЙКІСТЬ ЕНЕРГОСИСТЕМИ ПРИ КОРОТКИХ ЗАМІКАННЯХ

Вінницький національний технічний університет;

Анотація.

У роботі розглянуто особливості виникнення та перебігу перехідних процесів в енергосистемах під час коротких замикань, а також їх вплив на загальну стійкість роботи електроенергетичної системи. Проведено аналіз основних факторів, що визначають параметри перехідних процесів, та розглянуто методи розрахунку струмів короткого замикання. Обґрунтовано важливість комп'ютерного моделювання для підвищення точності оцінки аварійних режимів.

Ключові слова: енергосистема, перехідні процеси, стійкість, коротке замикання, струми КЗ, релейний захист, моделювання.

Abstract.

The paper examines transient processes in power systems during short circuits and their impact on system stability. The main factors influencing transient parameters and methods for calculating short-circuit currents are analyzed. The importance of computer modeling for accurate assessment of emergency conditions is emphasized.

Keywords: power system, transient processes, stability, short circuit, fault current, protection, modeling.

Вступ

Під час нормальної роботи енергосистеми параметри напруги, струму та частоти залишаються стабільними. Проте при виникненні коротких замикань або раптових змін навантаження в системі розвиваються перехідні процеси, які можуть призвести до втрати стійкості. Аналіз цих процесів є важливою складовою проектування, експлуатації та захисту електричних мереж.

Результати дослідження

Перехідні процеси в енергосистемі характеризуються швидкоплинними змінами електричних величин у часі. Основними причинами їх виникнення є короткі замикання, пуски потужних двигунів, зміни конфігурації мережі та перемикання обладнання. Під час короткого замикання в системі протікають великі струми, які викликають значні електродинамічні та теплові навантаження. Розрахунок цих струмів дозволяє визначити оптимальні параметри захисної апаратури та забезпечити термічну стійкість елементів мережі.

Для аналізу таких процесів застосовують математичні моделі, що описують динаміку генераторів, трансформаторів і ліній електропередачі. У сучасній практиці все більшого поширення набувають програмні комплекси ETAP, PSCAD, DIgSILENT PowerFactory, які дозволяють моделювати аварійні режими з урахуванням інерційності системи та параметрів збудження генераторів.

Забезпечення стійкості енергосистеми вимагає своєчасного відключення пошкоджених ділянок, коректної роботи релейного захисту та автоматизації. Важливим є також правильний вибір схеми заземлення нейтралі, що впливає на величину струмів замикання на землю та умови самозбудження генераторів.

Висновки

Отже, перехідні процеси, що виникають під час коротких замикань, суттєво впливають на стійкість енергосистеми. Точність розрахунку струмів короткого замикання визначає ефективність і надійність роботи системи захисту. Використання сучасних програмних засобів моделювання дозволяє підвищити рівень безпеки та оптимізувати роботу електричних мереж.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Тептя В. В., Кулик В. В. «Електромеханічні перехідні процеси в електроенергетичних системах». — Вінниця: ВНТУ, 2021.
<https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/book/665>
2. Переверев І. О., Савеленко І. В. «Перехідні процеси в електроенергетиці». — Кропивницький: ЦНТУ, 2018.
<https://dspace.kntu.kr.ua/server/api/core/bitstreams/25177c73-2022-4549-8562-ba5f30b83c87/content>
3. Аввакумов, В. Г., Терешкевич Л. Б. «Перехідні процеси в системах електропостачання». — Вінниця : ВНТУ, 2015.
<https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/download/69/117/129-1?inline=1>

Томляк Віктор Васильович — студент факультету електроенергетики та електромеханіки, кафедра електричних станцій та систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: viktom639@gmail.com

Tomlyak Viktor Vasylovych — student of the Faculty of Electrical Power Engineering and Electromechanics, Department of Electrical Stations and Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: viktom639@gmail.com

РОЗРОБЛЕННЯ ПРИКЛАДНОГО ЗАСТОСУНКУ ДЛЯ АНАЛІЗУ ВПЛИВУ ВДЕ НА СІЛЬСЬКІ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖІ

¹ Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Анотація

Запропоновано прикладну програму, яка дає змогу моделювати роботу енергетичної мережі, оцінювати втрати електроенергії, рівні напруги та визначати оптимальні точки приєднання відновлюваних джерел енергії та репрезентує результати у простій та наочній формі.

Ключові слова: відновлювані джерела енергії; розподільча електрична мережа; втрати потужності

Abstract

An application program is proposed that allows you to model the operation of the power grid, estimate electricity losses, voltage levels, and determine optimal connection points for renewable energy sources, and represents the results in a simple and visual form.

Keywords: renewable energy sources; electrical distribution network; power losses.

Вступ

На сьогоднішній день ми спостерігаємо тенденції докорінної зміни організації електричної системи загалом і електромереж зокрема. Ці зміни відбуваються з багатьох причин, головними з яких є стрімке зростання попиту на електроенергію внаслідок розвитку та використання новітніх інформаційних та промислових технологій і електротранспорту, впровадження цифрових технологій у сферу електроенергетики, а також постійно зростаюче використання відновлювальних джерел енергії (ВДЕ) для генерації. Окрім цього, вагомими причинами змін в організації електросистеми є енергетична національна безпека та незалежність, що особливо гостро відчуває Україна в теперішній воєнний період. Не слід забувати й про екологічний аспект розвитку електроенергетики. Згідно з Енергетичною стратегією України до 2050 року одним з пріоритетних напрямків нашої держави є досягнення кліматичної нейтральності енергетичного сектору [1].

Метою роботи є розроблення прикладної програми, яка дозволяє аналізувати вплив ВДЕ на параметри режиму роботи мережі у простій та зрозумілій формі, яку б могли використати представники територіальних громад.

Результати дослідження

Одним з шляхів подолання вказаних труднощів є децентралізація генерації електроенергії за допомогою ВДЕ. Перспективним в цьому плані є встановлення ВДЕ в ділянках електросистеми, яка обслуговує сільських електроспоживачів. Загалом сільські електромережі становлять значну частину всіх електромереж України, оскільки забезпечують велику кількість споживачів. Для сільських електромереж характерним є велика протяжність ліній, особливо за конфігурацією схеми «магістраль» для живлення кінцевих побутових споживачів, тому рівень втрат потужності і напруги в цих мережах є суттєвим [2]. Також вагомою проблемою є недостатня якість електроенергії в споживачів цих мереж, а саме недостатній рівень напруги (найбільше потерпають найвіддаленіші споживачі). В сільських електромережах спостерігається відсутність резервування потужності з причини недостатньої кількості трансформаторних підстанцій та ліній електропередачі, тому ці мережі мають обмежені можливості резервування потужності, що знижує їхню надійність. Не слід забувати й про незадовільний стан технічного оснащення сільських електромереж, що зумовлено, перш за все, великим терміном експлуатації електрообладнання, бо спорудження мереж відбувалося багато років тому в минулому столітті, а також тим, що процес модернізації цих мереж відбувається практично в останню чергу.

Очевидно, що подолання зазначених недоліків є комплексним завданням, яке потребує суттєвих грошових інвестицій та детального аналізу. Проте суттєво покращити якість електропостачання споживачів сільської місцевості можна за рахунок введення ВДЕ, тим паче з цією метою в територіальних

громад є можливість залучити грантові кошти для фінансування таких проєктів. При цьому важливим є вибір місця приєднання ВДЕ та потужності цих джерел. В різних наукових посібниках та статтях можна знайти методики та рекомендації з цього приводу [3, 4]. Однак досить часто представники територіальних громад стикаються з труднощами під час використання цих методик через складність розрахунків або обмеженим доступом. З метою полегшення процесу вибору місця приєднання ВДЕ, а також підбору необхідної потужності пропонується використати прикладну програму «РОЗРАХУНОК ВТРАТ ПОТУЖНОСТІ» (Power losses estimation), основна мета якої є надати інженерам та зацікавленим особам зручний інструмент для моделювання й аналізу втрат потужності в простій мережі розподілу енергії з врахуванням впливу ВДЕ. Запропонована програма дозволяє моделювати приєднання ВДЕ до будь-якого з вузлів місцевої магістральної електромережі. При цьому кожен вузол можна налаштувати за допомогою двох певних параметрів: активне навантаження, реактивне навантаження. Також користувачі можуть вказати мінімальне та максимальне навантаження відновлюваного джерела, щоб оцінити його вплив на електромережу. Використовуючи встановлені електротехнічні формули та алгоритми, програма розраховує втрати потужності в мережі за різних конфігурацій встановлення ВДЕ. Це включає сценарії як з інтеграцією відновлюваних джерел енергії, так і без них. Користувачі можуть створювати та порівнювати кілька сценаріїв, щоб зрозуміти, як різні конфігурації та розміщення ВДЕ впливають на загальні втрати потужності. Ця функція допомагає визначити оптимальні налаштування для мінімізації втрат. Інтерфейс програми був розроблений за допомогою React та TypeScript, що забезпечує високомодульну, зручну в обслуговуванні та масштабовану кодову базу.

Висновки

Запропоноване програмне забезпечення «РОЗРАХУНОК ВТРАТ ПОТУЖНОСТІ» (Power losses estimation) дозволяє аналізувати вплив ВДЕ на параметри режиму роботи мережі у простій та зрозумілій формі. Дана програма може використовуватися як в навчальному процесі для студентів напрямку «Електрична інженерія», так і інженерами-проектувальниками для попереднього технічного оцінювання доцільності встановлення ВДЕ в простих електромережах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Енергетичний хаб Європи: Україна схвалила Енергетичну Стратегію до 2050 року [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://greentransform.org.ua/ukrayina-shvalyla-energetychnu-strategiyu-do-2050-roku/?print-posts=pdf>
2. Rakhmonov I., Berdishev A., Khusanov B., Khaliknazarov U. and Utegenov U. General characteristics of networks and features of electricity consumers in rural areas. [Електронний ресурс] // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 883(1):012104, 2020. doi:10.1088/1757-899X/883/1/012104
3. Лежнюк, П. Д. Вплив розосереджених джерел енергії на оптимальний поточкорозподіл в електричних мережах / П. Д. Лежнюк, І. О. Гунько // Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 86-91. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.13.
4. G. Cavraro, A. Bernstein, V. Kekatos and Y. Zhang, "Real-Time Identifiability of Power Distribution Network Topologies With Limited Monitoring," in IEEE Control Systems Letters, vol. 4, no. 2, pp. 325-330, April 2020, doi: 10.1109/LCSYS.2019.2926101.

Николин Уляна Михайлівна — канд. техн. наук, доцент кафедри електричної інженерії, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Николин Петро Михайлович — асистент кафедри електричної інженерії, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Nykolyn Uliana M. — Cand. Sc. (Eng), Assistant Professor of the Electrical Engineering Department, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk

Nykolyn Petro M. — Assistant of the Electrical Engineering Department, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk

АНАЛІЗ ЗАВДАНЬ ТА ЗАСОБІВ ЗАХИСТУ РОЗПОДІЛЬНИХ УСТАНОВОК

Вінницький національний технічний університет

Анотація

В роботі розглянуто основні вимоги та задачі захисту електричного обладнання під час експлуатації та обслуговування розподільних установок електричних станцій та підстанцій. Показано, що слід приділяти велику увагу питанням захисту розподільних установок, а також сприяти професійному розвитку персоналу електричних станцій та підстанцій, для надійного функціонування об'єднаної енергетичної системи України

Ключові слова: розподільна установка, захист, експлуатація, обслуговування, обладнання, підстанція

Abstracts

The paper considers the basic requirements and tasks of protecting electrical equipment during the operation and maintenance of distribution facilities at power plants and substations. It shows that great attention should be paid to the protection of distribution facilities, as well as to the professional development of power plant and substation personnel, in order to ensure the reliable operation of Ukraine's integrated energy system.

Keywords: distribution facility, protection, operation, maintenance, equipment, substation.

Вступ

Об'єднана електроенергетична система (ОЕС) України здійснює централізоване технічне забезпечення електричною енергією споживачів, а також експорт та імпорт електроенергії. Протягом останніх років спостерігається тенденція до збільшення обсягів відновлення електричних мереж, їх капітального ремонту, реконструкції та модернізації. Проте, темпи збільшення обсягів зазначених робіт та коштів на їх реалізацію є недостатніми для підтримання необхідного рівня технічного стану електромереж та забезпечення їх надійної роботи. Частково це зумовлено руйнуванням низки енергетичних об'єктів внаслідок російської агресії. Планом розвитку магістральних (міждержавних) електричних мереж передбачається будівництво нових підстанцій та ліній електропередачі, відновлення та реконструкція наявних об'єктів магістральних (міждержавних) електричних мереж із збільшенням їх потужності та пропускної здатності [1, 2].

Результати дослідження

Електричні підстанції – важливі елементи електричних мереж, які визначають їх структуру та властивості. Розташування підстанцій, їх схема та потужність залежать від мереж, для живлення яких вони призначені. На підвищувальних і понижувальних підстанціях встановлюють розподільні установки (РУ), призначені для прийому й розподілу електроенергії. До збірних шин розподільних установок через комутаційні апарати приєднуються генератори, трансформатори, повітряні і кабельні лінії та інше обладнання. РУ різних класів напруг мають між собою трансформаторні зв'язки.

Сучасне електротехнічне обладнання станцій та підстанцій досить різноманітне, в переважній більшості складне по конструкції, має автоматичні пристрої, в тому числі релейного захисту і автоматики. Тому обслуговування електрообладнання розподільних установок, пристрої релейного захисту та автоматики може надаватись тільки висококваліфікованому персоналу, який відмінно володіє знаннями і зможе забезпечити якісний нагляд та догляд за обладнанням.

В роботі досліджуються завдання та обов'язки експлуатаційного персоналу під час обслуговування електрообладнання та захисту розподільних установок електричних станцій та підстанцій.

Персонал усіх виробничих підприємств електроенергетичної системи зобов'язаний забезпечувати виконання вимог безперебійності, надійності, економічності, підтримки нормальної якості енергії, що відпускається: частоти і напруги електричного струму, тиску і температури пари і гарячої води; захисту навколишнього середовища і людей від шкідливих впливів виробництва [3, 4].

До задач експлуатації РУ відносять [3]:

- забезпечення відповідності режимів роботи РУ і окремих кіл технічним характеристикам встановленого обладнання;

- підтримання схеми РУ, станції, підстанції, яка б забезпечувала надійну роботу обладнання і селективну роботу пристроїв релейного захисту й автоматики;
 - забезпечення нагляду і обслуговування обладнання і приміщень РУ, а також усунення несправностей якнайшвидше;
 - своєчасне виконання випробувань і ремонту обладнання;
- дотримання встановленого порядку і послідовності виконання перемикань в РУ.
- Основні вимоги, які висувають до обладнання і приміщень розподільних установок [3, 5]:
- обладнання розподільних установок за своїми паспортними даними повинно задовольняти умовам роботи в нормальному режимі та при КЗ. Апарати і шини повинні бути термічно і динамічно стійкими;
 - ізоляція обладнання повинна витримувати можливі підвищення напруги при атмосферних і внутрішніх перенапругах;
 - все обладнання повинно надійно працювати при допустимих перевантаженнях;
 - приміщення РУ повинні бути безпечні і зручні при обслуговуванні обладнання персоналом в усіх режимах роботи, а також при ремонті;
 - приміщення РУ повинні мати захисні засоби і засоби гасіння пожежі;
 - в закритих РУ температура і вологість мають бути такими, щоб не зволожувалась ізоляція. Температура в закритих розподільних установках повинна бути не вище 40 °С; вентиляція приміщень повинна бути ефективною;
 - всі приміщення РУ повинні мати робоче і аварійне освітлення.

Висновки

Таким чином, застосування пристроїв релейного захисту та автоматики на розподільних установках електричних підстанцій є не просто бажаним, а життєво необхідним. Вони гарантують технічну цілісність обладнання, безперебійну роботу електроустановок та об'єктів в цілому та стабільність енергопостачання споживачам. У майбутньому роль релейного захисту лише зростатиме, адже зростає потреба в гнучкій, безпечній та надійній енергосистемі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Електроенергетика України: стан і перспективи. 2023. URL: <https://blog.youcontrol.market/i/elektroienierghietika-ukrayini-stan-i-pierspiektivi/>
2. Енергетична стратегія України на період до 2050 року URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/373-2023-%D1%80/conv#n4>
3. ГКД 34.20.507-2003. Правила технічної експлуатації електричних станцій і мереж. К.: Міністерство палива та енергетики, 2003.
4. Правила улаштування електроустановок. Видання офіційне. Міненерговугілля України. Х.: Видавництво «Форт», 2017. 760 с.
5. URL: <https://kek.edu.ua/6-ekspluatacija-elektrichnih-rozpodilchih-ustanovok/>

Гресько Андрій Олегович – студент, факультет електроенергетики та електромеханіки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: hreskoao@gmail.com

Тептя Віра Володимирівна – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електричних станцій та систем, факультет електроенергетики та електромеханіки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: teptyavira@gmail.com

Hresko Andrii O. – student of the Department of electric power stations and systems, Faculty of Power Engineering and Electromechanics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine; e-mail: hreskoao@gmail.com

Vira V. Teptia – Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor of the Department of Electrical Power Plants and Systems, Faculty of Electrical Power Engineering and Electromechanics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: teptyavira@gmail.com

ВПЛИВ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ НА ЗНИЖЕННЯ ВТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі досліджено вплив децентралізованих систем електропостачання на зменшення технологічних втрат електроенергії в розподільчих мережах. Проаналізовано структуру системи з розосередженими джерелами, визначено технічні та економічні переваги інтеграції локальної генерації у мережі 6–35 кВ, наведено підходи до моделювання втрат і підвищення енергоефективності за умов Smart Grid.

Ключові слова: децентралізовані системи електропостачання; розосереджене генерування; відновлювані джерела енергії; Smart Grid; технологічні втрати.

Abstract

The paper investigates the impact of decentralized power supply systems on reducing technological losses of electricity in distribution networks. The structure of the system with distributed sources is analyzed, the technical and economic advantages of integrating local generation into the 6–35 kV network are determined, approaches to modeling losses and increasing energy efficiency under Smart Grid conditions are presented

Keywords: decentralized power supply systems; distributed generation; renewable energy sources; Smart Grid; technological losses.

Вступ

Сучасна енергетика України перебуває на етапі трансформації у напрямку децентралізації, цифровізації та підвищення енергоефективності. Понад половина розподільчих мереж 6–35 кВ перебуває у стані зношеності, що зумовлює зростання технологічних втрат і зниження надійності електропостачання [1]. Одним із стратегічних напрямів є інтеграція розосереджених джерел електроенергії (сонячних, вітрових, когенераційних установок) безпосередньо в розподільні мережі, що формує основу децентралізованих систем електропостачання.

Мета роботи полягає у визначенні технічних і економічних переваг децентралізованих систем у зниженні втрат електроенергії та покращенні показників якості електропостачання.

Результати дослідження

Розосереджене генерування (РГ) розглядається як ключовий елемент децентралізованих систем, який змінює класичну структуру енергосистеми з одностороннім потоком потужності на двонапрявну [1]. Підключення генераторів малої та середньої потужності на рівні низьких і середніх напруг (0,4–35 кВ) дозволяє зменшити втрати у лініях і трансформаторах за рахунок зниження відстані транспортування електроенергії.

Розрахунки, виконані для локальних електричних систем (ЛЕС) з фотоелектричними станціями потужністю до 5 МВт, показали зменшення сумарних технологічних втрат у мережі на 8–12 % у порівнянні з централізованим живленням [1]. При цьому покращуються показники SAIDI та SAIFI завдяки зменшенню довжини активних потоків енергії та підвищенню коефіцієнта резервування.

Таблиця 1 – Порівняння втрат електроенергії у централізованій і децентралізованій системі

Тип системи	Середні втрати, % від переданої енергії	Індекс SAIDI, хв	Індекс SAIFI, раз/рік
Централізована (без ВДЕ)	12,3	730	5,1
З децентралізованою генерацією	10,1	540	3,8
З мікромережею та накопиченням енергії	8,6	420	3,2

Зниження втрат у децентралізованих системах пояснюється рядом технічних чинників. По-перше, потужність передається на менші відстані, що зменшує активні втрати за законом:

$$\Delta P = I^2 R. \quad (1)$$

де I – струм у лінії,

R – активний опір провідника.

Зменшення струму через локальне генерування знижує втрати пропорційно квадрату струму.

По-друге, впровадження керування реактивною потужністю інверторних ВДЕ дозволяє оптимізувати напругу у вузлах споживання, зменшуючи додаткові втрати від відхилень напруги [1].

Суттєвий ефект забезпечує балансування навантаження та генерації. У пікові години споживання локальні джерела забезпечують часткове живлення споживачів, зменшуючи навантаження на магістральні підстанції. При мінімальному навантаженні надлишок енергії може бути акумульований у батарейних накопичувачах або переданий у мережу. Такі режими моделюються за допомогою методу натурно-імітаційного моделювання (НІМ), що враховує ймовірнісні характеристики роботи ВДЕ та споживання [1].

У літературі [1] наведено приклади практичного застосування таких підходів для електричних мереж АТ «Вінницяобленерго». Зокрема, використання розподілених джерел генерування (сонячних СЕС потужністю 0,5–2 МВт) у мережах 35–110 кВ дозволило знизити технологічні втрати на 11 % і стабілізувати рівень напруги в межах $\pm 2,5$ %.

У міжнародній практиці перехід до активних розподільних мереж (Smart Grids) із залученням децентралізованих джерел дозволяє не лише зменшити втрати, але й відкласти інвестиції в розвиток магістральних ліній, що вкрай необхідно в Українських реаліях, де велика зношеність та застарілість обладнання. За сценарієм Smart Networks, ефективна інтеграція розосереджених генераторів і керованого навантаження забезпечує зменшення необхідної потужності централізованих джерел на 20–25 % при підвищенні коефіцієнта використання мережевої інфраструктури [2].

Для України, де втрати електроенергії в розподільних мережах сягають 10–13 % [1], потенціал впровадження децентралізованих систем оцінюється як один із найвищих у Східній Європі. Розвиток мікромереж (Microgrids), що об'єднують ВДЕ, накопичувачі енергії та «розумне» керування навантаженням, може забезпечити скорочення втрат на 2–3 % додатково до вже досягнутого ефекту.

Системи автоматичного керування (CAK) у складі Smart Grid, оснащені SCADA-модулями, дозволяють моніторити параметри мереж у реальному часі та регулювати потоки потужності. Використання технології Dynamic Line Rating (динамічне визначення допустимого навантаження лінії) дає змогу оптимізувати розподіл потужності залежно від температури та погодних умов, знижуючи ризик перевантаження та додаткових втрат [2].

Економічна оцінка ефекту від децентралізації підтверджує, що скорочення втрат на кожен 1 % у мережах 10–35 кВ дає економію понад 1,2 млн кВт·год на рік у межах одного оператора системи розподілу. З урахуванням середнього тарифу 4,5 грн/кВт·год це становить близько 5,4 млн грн щорічно, що перевищує витрати на встановлення локальної генерації малої потужності.

Важливо зазначити, що децентралізовані системи забезпечують не лише енергоефективність, але й підвищують стійкість системи до аварійних ситуацій. У разі пошкодження магістральної лінії мікромережа може перейти в автономний режим живлення, підтримуючи критичні навантаження без участі центрального джерела [2].

Таким чином, впровадження децентралізованих систем електропостачання сприяє комплексному підвищенню ефективності розподільних мереж — технічної, економічної та експлуатаційної.

Висновки

Аналіз показав, що децентралізовані системи електропостачання з використанням розосереджених джерел генерування є ефективним засобом зниження технологічних втрат у розподільних мережах. Їх інтеграція забезпечує локальне балансування навантажень, скорочує довжину енергетичних потоків, стабілізує рівень напруги та підвищує надійність живлення.

Використання Smart Grid-технологій і систем автоматичного керування дозволяє досягати зменшення втрат на 10–15 %, одночасно підвищуючи якість електроенергії та резервування живлення. Практичне впровадження таких рішень доцільне в мережах 6–35 кВ операторів системи розподілу України, особливо в регіонах із розвинутою інфраструктурою ВДЕ.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Лежнюк П.Д., Комар В.О., Сікорська О.В. Розосереджене генерування в задачах підвищення енергоефективності розподільних електричних мереж [Текст] : монографія / П. Д. Лежнюк, В. О. Комар, О. В. Сікорська. – Вінниця: ВНТУ, 2023. – 195 с.
- [2] Jenkins, N., Ekanayake, J. B. and Strbac, G. (2010) Distributed Generation, 1st ed., IET, UK. <https://doi.org/10.1049/PBRN001E>

Кочмарук Володимир Олександрович — студент, факультет електроенергетики та електромеханіки, група ECM-24м, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: vova.kochmaryk1400@gmail.com

Комар В'ячеслав Олександрович – д.т.н., проф., зав. кафедри електричних станцій та систем, факультет електроенергетики та електромеханіки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: kvo1976@ukr.net

Нетребський Володимир Васильович — кандидат технічних наук, доцент, факультет електроенергетики та електромеханіки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: netrebbskiy@ukr.net

Kochmaruk Volodymyr Oleksandrovyich — student, Faculty of Electrical Power Engineering and Electromechanics, ECM-24m group, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: vova.kochmaryk1400@gmail.com

Komar Viacheslav Oleksandrovyich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Electrical Power Plants and Systems, Faculty of Electrical Power Engineering and Electromechanics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: kvo1976@ukr.net

Netrebbskiy Volodymyr Vasylovych — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Faculty of Electrical Power Engineering and Electromechanics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: netrebbskiy@ukr.net

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ ТА СИСТЕМ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ НА СТІЙКІСТЬ ОБ'ЄДНАНОЇ ЕНЕРГОСИСТЕМИ УКРАЇНИ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі розглянуто вплив відновлюваних джерел енергії на стійкість транзитних перетоків потужності в об'єднаній енергосистемі України та визначено роль систем накопичення енергії у забезпеченні стабільності енергетичних режимів.

Ключові слова: відновлювальні джерела енергії, системи накопичення енергії, стійкість енергосистеми.

Annotation

The paper examines the impact of renewable energy sources on the stability of transit power flows in the unified power system of Ukraine and identifies the role of energy storage systems in ensuring the stability of energy regimes..

Key words: renewable energy sources, energy storage systems, energy system sustainability..

Вступ

Перспектива значного зростання частки відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) в структурі генерації України суттєво змінює режими роботи об'єднаної енергосистеми (ОЕС), зокрема впливає на стабільність та точність прогнозування транзитних перетоків потужності. Впровадження систем накопичення енергії (СНЕ) може стати основою для забезпечення енергетичної стійкості та надійності мережі. Вони здатні компенсувати коливання виробітку ВДЕ та підтримувати баланс потужності в режимі реального часу.

Результати дослідження

ОЕС України перебуває у процесі глибокої трансформації, спричиненої інтеграцією до європейської енергосистеми ENTSO-E, активним розвитком сонячних і вітрових електростанцій, а також зростанням попиту на гнучкі засоби балансування генерації й споживання. В умовах мінливої генерації та нестабільних зовнішніх перетоків особливого значення набуває забезпечення стійкості транзитних потоків електроенергії, що визначають здатність системи передавати потужність між регіонами та до сусідніх країн.[1]наприклад у південних областях України, здатна змінювати напрямки потоків (створювати реверсні або переважані режими на перетинах), що підсилює технічні ризики і вимагає додаткових резервів потужності.

У цьому контексті системи накопичення енергії (СНЕ) стають критично важливим елементом підвищення гнучкості мережі. Сучасні акумуляторні накопичувачі (BESS), гідроакумулятивні електростанції та гібридні рішення (наприклад водневі накопичувачі в комбінації з газовими турбінами) забезпечують миттєве регулювання частоти й напруги, можуть поглинати надлишкову енергію під час пікової генерації та віддавати її під час дефіциту. Це дозволяє зменшувати навантаження на ключові транзитні вузли і стабілізувати переток потужності.

В Україні вже реалізовані приклади великих проєктів СНЕ. У 2025 році компанія DTEK спільно з Fluence Energy ввели в експлуатацію портфель батарейних накопичувачів загальною потужністю 200 МВт та ємністю 400 МВт·год, розташований у Київській і Дніпропетровській областях (Рис.1). Ці системи інтегровані в ОЕС через Ukrenergo і надають послуги з регулювання частоти та підтримання стійкості режимів, демонструючи можливість стабілізації транзитних потоків і швидкого реагування на коливання генерації.[2]



Рис.1 СНЕ компанії DTEK[2]

Ще один репрезентативний приклад — група KNESS, яка у 2025 році розпочала будівництво низки промислових систем накопичення енергії, зокрема Зорянська БЕСС у Кіровоградській області [3]. Ця система належить до новітнього покоління акумуляторних комплексів, призначених для надання послуг з регулювання частоти та балансування навантаження в енергосистемі. «Зорянська БЕСС» стала одним із переможців спеціального аукціону «Укренерго» з відбору резервів підтримки частоти на 2025–2030 рр., що підтверджує її інтеграцію до національної системи регулювання потужності.



Рис.2 СНЕ розроблена та вироблена групою компаній KNESS[3]

Інтеграція ВДЕ та систем накопичення енергії безпосередньо впливає на розподіл навантажень у мережі та параметри міжсистемних перетоків. У години високої генерації СЕС у південних областях виникають реверсні потоки у напрямку центральних регіонів, що може призводити до перевантаження 330-кВ перетинів «Південь–Центр». Встановлення БЕСС у таких вузлах дозволяє зменшити амплітуду коливань перетоків та забезпечити локальне поглинання надлишкової енергії, особливо в обідні години.

Додатковий ефект спостерігається у вечірні періоди: накопичувачі, віддають накопичену енергію в години пікового споживання, тим самим розвантажуючи міжрегіональні лінії і покращуючи стійкість транзитних потоків між південними та північними регіонами. Це дозволяє скоротити потребу у включенні резервних ТЕС і допомагає контролювати частоту запобігши аварійним станам у системі.

Важливим напрямом розвитку є також розміщення накопичувачів поблизу ВДЕ-кластерів, зокрема в Миколаївській, Одеській та Кіровоградській областях. Такі об'єкти діють як буфер між генерацією і магістральними лініями, зменшуючи динамічні коливання потужності та стабілізуючи напругу в точках приєднання. Практика показує, що навіть 50–100 МВт системи накопичення здатні зменшити добову варіацію транзиту на 10–15 %, що істотно підвищує коефіцієнт використання пропускної здатності мережі.

Висновки

Зростання частки сонячної та вітрової генерації створює потребу у швидкодіючих регулюючих засобах, здатних компенсувати коливання виробітку та підтримувати частотну рівновагу. У цьому контексті системи накопичення енергії виступають ключовим елементом підвищення гнучкості, стабільності та надійності роботи енергосистеми. Реалізовані проєкти, такі як DTEK–Fluence, демонструють практичний потенціал технологій СНЕ у стабілізації транзитних потоків, балансуванні навантаження та забезпеченні резервів потужності. Подальший розвиток систем накопичення, їх інтеграція у регіональні енергетичні вузли та розширення ринку гнучкості є необхідними передумовами підвищення стійкості міжрегіональних перетоків і зміцнення енергетичної безпеки України.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Six options to boost power transfers from Continental Europe to Ukraine, for the next two winters Ukraine's power network integration with the EU. Susanne Nies, Oleh Savvitskyi.
URL: <https://greendealukraine.org/assets/images/reports/grid-solutions-ukraine-next-winters-final.pdf>
 2. ДТЕК разом із американською Fluence побудував найбільший комплекс установок зберігання енергії в Україні на 200 МВт 11 Вересня 2025 URL: <https://dtek.com/media-center/news/dtek-and-fluence-energise-the-largest-battery-storage-facility-in-ukraine-with-a-total-capacity-of-200-mw/>
 3. Energy storage system developed and produced by KNESS has been certified for compliance with the ancillary services requirement URL: <https://kness.energy/en/news/energy-storage-system-developed-and-produced-by-kness-has-been-certified-for-compliance-with-the-ancillary-services-requirement>
 4. Ukraine: Energy Storage and Ancillary Services Market Development Support Ukrenergo, November 4, 2024 . URL: <https://energystoragecoalition.eu/wp-content/uploads/2024/12/Ukrenergo.pdf>
 5. Maintaining Ukraine's grid reliability under rapid growth of renewable electricity share: challenges in the pre-war, war-time, and post-war periods. International Journal of Sustainable Energy Planning and Management, 40, 41–54. Kurbatova, T., Sidortsov, R., Trypolska, G., Hulak, D., & Sotnyk, I. (2024).
URL: <https://doi.org/10.54337/ijsepm.8112>
- Лащенко Юрій Володимирович** — студент, факультет електроенергетики та електромеханіки, група ЕСМ-24м, Вінницький національний технічний університет, Вінниця,
Вишневецький Святослав Янович — кандидат технічних наук, доцент кафедри електричних станцій та систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: vyshnevskiy.s.y@vntu.edu.ua
 Науковий керівник: **Вишневецький Святослав Янович** — кандидат технічних наук, доцент кафедри електричних станцій та систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: vyshnevskiy.s.y@vntu.edu.ua
Lashchenko Y. - student, Vinnitsa National Technical University, student of power plants and systems department; Vinnitsa, Ukraine;
Supervisor: Vyshnevskii S. – Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Assistant Professor of power plants and systems, Vinnitsa National Technical University; Vinnitsa, Ukraine; vyshnevskiy.s.y@vntu.edu.ua.

Електронне наукове видання

**Оптимальне керування електроустановками
(ОКЕУ - 2025)**

Матеріали VI Міжнародної науково-технічної
конференції

22-23 жовтня 2025 року

Збірник наукових праць

Матеріали подаються в авторській редакції

Підписано до видання 29.10.2025 р.

Гарнітура Times New Roman.

Зам. № P2025-153

Видавець та виготовлювач
Вінницький національний технічний університет,
Редакційно-видавничий відділ.

ВНТУ, ГНК, к. 114.

Хмельницьке шосе, 95,

м. Вінниця, 21021.

press.vntu.edu.ua,

Е-mail: irvc.vntu@gmail.com.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.