НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

ПРОБЛЕМИ СУЧАСНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ І АВТОМАТИКИ В СИСТЕМІ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ
присвячена пам'яті династії Іноземцевих

Матеріали XIII Міжнародної
науково-технічної конференції м. Київ, 18 листопада 2026 р.

Problems of modern power engineering and automation in the system nature management
dedicated to the memory of the Inozemtsev dynasty

Proceedings of the XIII International
Scientific-Technical Conference Kyiv,18 of November, 2026

Київ 2026

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
Навчально-науковий інститут енергетики, автоматики і енергозбереження

ПРОБЛЕМИ СУЧАСНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ І АВТОМАТИКИ В СИСТЕМІ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ

присвячена пам'яті династії Іноземцевих

Матеріали
XIII Міжнародної науково-технічної конференції м. Київ, 18 листопада 2026 р.

Problems of modern power engineering and automation in the system nature management dedicated to the memory of the Inozemtsev dynasty

Proceedings of the XIII International
Scientific-Technical Conference Kyiv,18 of November, 2026

Київ 2026

УДК 621+536

Голова організаційного комітету

Ткачук В.А., ректор Національного університету біоресурсів і природокористування України;

Співголови організаційного комітету

Тонха О.Л., проректор з наукової роботи та інноваційної діяльності;

Каплун В.В., д.т.н., професор, директор ННІ енергетики, автоматики і енергозбереження;

Члени організаційного комітету

Бабак В.П., директор інституту загальної енергетики НАН України (за згодою);

Жаркін А.Ф., директор Інституту електродинаміки НАН України (за згодою);

Яцкевич Ю., професор Університету Британської Колумбії, м. Ванкувер, Канада (за згодою);

Кудря С.О., директор Інституту відновлюваної енергетики НАН України (за згодою)

Садовий Є.А., директор з переробки продукції ТОВ «Астарта-Київ» (за згодою);

Сігал О.І., директор Інституту промислової екології (за згодою);

Куковальський В.О., генеральний директор ТОВ «Енерго-промислова група «Югенергопромтранс» (за згодою);

Гловацький Ш., професор Університету, кафедра основ інженерії та енергетики, Варшавський університет природничих наук – SGGW, Польща (за згодою);

Монастирський З.Я., голова ради директорів ГК «Світлотек» (за згодою).

Заблодський М.М., заступник директора ННІ енергетики, автоматики і енергозбереження з наукової роботи, - співголова організаційного комітету;

Окушко О.В., завідувач кафедри електротехніки, електромеханіки та електротехнологій, - співголова організаційного комітету;

Сорокін Д.С.., доцент кафедри електротехніки, електромеханіки та електротехнологій - відповідальний секретар комітету;

Чуєнко Р.М., доцент кафедри електротехніки, електромеханіки та електротехнологій - секретар комітету;

Васюк В.В., доцент кафедри електротехніки, електромеханіки та електротехнологій - секретар комітету;

Сподоба М.О, асистент кафедри електротехніки, електромеханіки та електротехнологій - секретар комітету;

Проблеми сучасної енергетики і автоматикив системі природокористування: Матеріали наук.-техн конф., м. Київ 18 листопада.

©НУБіП 2026

ЗМІСТ

СЕКЦІЯ 1. СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ ТА ЦИФРОВА ЕНЕРГЕТИКА: ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА, ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЇ ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ. 18

A MULTILEVEL METHOD FOR ASSESSING THE EFFECTIVENESS OF AN EMS FOR A LOCAL THREE-PHASE ELECTRICAL FACILITY *O. V. Okushko, PhD in Engineering, Associate Professor; R. Yu. Cherednychenko, PhD Student* 18

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЛІНІЙНИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ *Габльовська Н.Я., к.т.н., доцент; Шиндак Л.М., асистент; Нестерук М.О. студент групи КІ-26-1* 19

ГЕОМЕТРИЧНИЙ АНАЛІЗ ПРОСТОРОВОЇ ОРІЄНТАЦІЇ ПЛОЩИНИ СТЕЖЕННЯ ЗА СОНЦЕМ ДЛЯ ПОВІТРЯНОГО КОЛЕКТОРА *Коробка С. В., к.т.н., доцент; Стукалець І. Г., к.т.н., доцент* 20

ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ОБ'ЄКТІВ ІНФРАСТРУКТУРИ УПРАВЛІННЯ ВІДХОДАМИ: ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНІ МЕХАНІЗМИ ЗНИЖЕННЯ ЕНЕРГОЗАЛЕЖНОСТІ *Нижниченко Я. Є., канд. екон. наук, доцент* 22

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИЙ ВИМІРЮВАЛЬНИЙ КАНАЛ ОБЛІКУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА ВИХОДІ МЕРЕЖЕВОГО ФОТОЕЛЕКТРИЧНОГО ІНВЕРТОРА З ОЦІНЮВАННЯМ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ *Ващишак І. Р., к.т.н., доцент; Мацюк І. В., аспірант; Соколов Є. О., аспірант* 24

ДОСЛІДЖЕННЯ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ЗА ПОКАЗНИКОМ НЕЗМІННОСТІ ПОТУЖНОСТІ З НЕСИМЕТРИЧНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ ТА СИМЕТРУЮЧИМ ПРИСТРОЄМ *Зубенко Є. В., здобувач другого (магістерського) рівня вищої освіти, Бялобржеський О. В., к.т.н., доцент, Національний університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, Україна* 26

КЛАСИФІКАЦІЯ ПРОФІЛІВ ДОБОВОГО СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ДЛЯ ФОРМУВАННЯ ТЕСТОВОЇ ПРОГРАМНОЇ МОДЕЛІ MICROGRID *Велігорський Б. О., аспірант; Бодунов В. М., к. т. н., доцент* 28

ДОСЛІДЖЕННЯ СПОСОБІВ ЗНИЖЕННЯ ВТРАТ В СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРАХ НАРУГОЮ 10/0,4 кВ *Наливайко В. А., к.т.н., доцент; Козаченко Д.Ю., магістр* 30

АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ СУЧАСНОГО ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ В ПЛАНУВАННІ РЕКОНСТРУКЦІЇ ОБ'ЄКТІВ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ *Руденко Є. О, Трунова І. М., к.т.н., доцент* 31

ВИКОРИСТАННЯ НЕЙРОРЕГУЛЯТОРА В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ СЕПАРАТОРІВ МОЛОКА

Задорожна В.М., аспірантка, Лисиченко М.Л, д.т.н., професор, ... 32
ДОСВІД ЗАСТОСУВАННЯ ДЖЕРЕЛА БЕЗПЕРЕБІЙНОГО ЖИВЛЕННЯ SMART UPS LP-1000 PRO ДЛЯ ЖИВЛЕННЯ ЧПК HELL GRAUTE SESTEM K5 *Лисиченко Р. М., к.т.н.* 34
КОНСТРУКТИВНА СХЕМА АВТОМАТИЗОВАНОЇ РОЛИКОВОЇ КОНВЕЄРНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ ЛАЗЕРНОЇ ОБРОБКИ ІНКУБАЦІЙНИХ ЯЄЦЬ *Міленін Д.М., к.т.н., доцент, Лисиченко М. Л., д.т.н., професор*..... 36
СИСТЕМА ЕНЕРГОІНФОРМАЦІЙНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ СПОЖИВАЧІВ КРИТИЧНОЇ ГРУПИ *Коломієць Н. П., здобувач вищої освіти; Каплун В. В., д.т.н., професор*..... 38
ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ НАКОПИЧУВАЧА НА АКУМУЛЯТОРАХ «ДРУГОГО ЖИТТЯ» ДЛЯ ОБМЕЖЕННЯ МАКСИМУМУ ПОТУЖНОСТІ АГРОПІДПРИЄМСТВА З УРАХУВАННЯМ ДЕГРАДАЦІЇ *Лимарь В. О., здобувач вищої освіти; Павленко В. М., к.т.н., доцент;* 40
ОЦІНЮВАННЯ ДЕТЕРМІНОВАНОСТІ ТА ВІДМОВОСТІЙКОСТІ ПРОЦЕСНОЇ ШИНИ ЦИФРОВОЇ ПІДСТАНЦІЇ 110/10 КВ ЗА УМОВ МЕРЕЖЕВИХ ЗБОЇВ *Мельник Д. Л., здобувач вищої освіти; Павленко В. М., к.т.н., доцент;* 42
ПРОГНОЗУВАННЯ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА 110 КВ ЗА ДИНАМІКОЮ ІНДЕКСУ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ТА ГАЗІВ, РОЗЧИНЕНИХ В ОЛИВІ *Мельник Л. В., здобувач вищої освіти; Павленко В. М., к.т.н., доцент;*..... 44
КОМПЛЕКСНЕ ОЦІНЮВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ АВТОНОМНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ З РЕГУЛЬОВАНОЮ КОМПЕНСАЦІЄЮ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ *Суддя М. М., здобувач вищої освіти; Макаревич С. С., к.т.н., доцент*..... 46
ДОСЛІДЖЕННЯ НАДІЙНІСНО-ВАРТІСНИХ ПОКАЗНИКІВ МОДЕРНІЗАЦІЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ (НА ПРИКЛАДІ АДМІНІСТРАТИВНОЇ БУДІВЛІ) *Хомко Б. О., здобувач вищої освіти; Макаревич С. С., к.т.н., доцент*..... 48
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПУСКОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВІДЦЕНТРОВОГО НАСОСА З АСИНХРОННИМ ДВИГУНОМ КЛАСУ IE4 *Заблодський М. М., д.т.н., професор; Суржик В. В., аспірант.*..... 50
ЧАСТОТНЕ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ СТРІЧКОВОГО КОНВЕЄРА: ВПЛИВ НА ДИНАМІЧНІ НАВАНТАЖЕННЯ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ *Юрченко О.Ю., PhD, доцент; Лулаков І.О., магістрант; Андрусяк В.О., PhD, старший викладач*..... 51
ЦИФРОВІ ДВІЙНИКИ В ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ: ПОНЯТТЯ, ЗАСТОСУВАННЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ *Бабич О. В.,*

здобувач вищої освіти; Павленко В.М., к. т. н., доцент 53
РОЗРОБЛЕННЯ І ДОСЛІДЖЕННЯ ВІБРАЦІЙНОЇ ЛОТКОВОЇ СУШАРКИ З ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМ ПРИВОДОМ ДЛЯ СУШІННЯ СИПУЧОЇ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ПРОДУКЦІЇ *Котляр Т. А., магістр 2 року навчання; Червінський Л. С., д.т.н., професор* 54
ЦИФРОВИЙ ДВІЙНИК ПОЛІФУНКЦІОНАЛЬНОГО ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ДЛЯ БІОГАЗОВИХ УСТАНОВОК *Клендій П.Б., к.т.н., доцент* 56
ІНТЕГРАЦІЯ ЦЕНТРІВ ОБРОБКИ ДАНИХ В ЖИТЛОВІ ТА ГРОМАДСЬКІ БУДІВЛІ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ Литвин В.І., аспірант, ... 58
ВПЛИВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА ПРИВОДНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГНОЄПРИБИРАЛЬНИХ ТРАНСПОРТЕРІВ *Синявський О. Ю., к.т.н., доцент; Коваль В. В., студент магістратури* 59
РОЗВИТОК МЕТОДА ДІАГНОСТИКИ МОДУЛІВ СИСТЕМ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ ЗЧИТУВАННЯ ДАНИХ ІЗ ШИНИ ОБМІНУ *Яцун О.В., к.ф.-м.н., асистент; Шван А.В., студент; Швець О.Б., студент;* 61
ВИЗНАЧЕННЯ ЗМІНИ РІВНЯ СИНУСОЇДАЛЬНОЇ НАПРУГИ МЕРЕЖІ ЗА ШВИДКІСТЮ ЗМІНИ ЇЇ ФРОНТУ ЯК ЗАСІБ ПІДВИЩЕННЯ ШВИДКОДІЇ ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ *Афінович С. Г., аспірант; Кривоносов В. Є., д.т.н., професор* 62
ІДЕНТИФІКАЦІЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧИХ РЕЖИМІВ ІЧ-МІКРОНІЗАЦІЇ ЗЕРНА *Калініченко Р. А., к.т.н., доцент* 64
СИМУЛЯЦІЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ПРОМИСЛОВИХ IOT-ПРИСТРОЇВ ДЛЯ АНАЛІЗУ РЕЖИМІВ РОБОТИ ОБЛАДНАННЯ *Мурований В.В., магістр; Лебеденко Ю. О., к.т.н., доцент* 65
ВПЛИВ ГЕОМЕТРІЇ РОБОЧОЇ ЗОНИ НА ЕЛЕКТРИЧНЕ ПОЛЕ ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПОРОШКОВОГО ФАРБУВАННЯ *Науменко В. С., аспірант;Червінський Л. С., д.т.н., професор* 66
ОБҐРУНТУВАННЯ СКЛАДУ ТЕХНІЧНОГО ОБЛІКУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ПРОМИСЛОВОГО ПІДПРИЄМСТВА ЗА КРИТЕРІЄМ ЦІННОСТІ ІНФОРМАЦІЇ *Петрова К. Г., к.т.н., доцент; Щєпін В. В., здобувач вищої освіти* 68
ЦИФРОВИЙ МОНІТОРИНГ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ВАКУУМНИХ ВИМИКАЧІВ У РОЗПОДІЛЬЧИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ 6-35 кВ *Семенов А. О., канд. фіз.-мат. наук, доцент; Радченко О. І., здобувач вищої освіти СВО «Бакалавр»* 70
ECONOMIC ASPECTS OF ELECTRICITY USE IN LUXEMBOURG HOUSEHOLDS *Taisia Mykolaievska, Student* 72
ANELASTIC and ELASTIC STRAINS-DEFORMATIONS in SiO_2,

CONCRETES, NANOCOMPOSITES of MULTIWALLED CARBON NANOTUBES and POLYMERS, SCIENTIFIC and TECHNICAL PRINCIPLES of ENSURING the SUSTAINABILITY of LAND RECLAMATION HYDROTECHNICAL STRUCTURES in the CONDITIONS of CLIMATIC and ANTHROPOGENIC CHALLENGES Il'in P. P.[1], Ph.D., Assistant Professor; Onanko Y. A.[2], Ph.D., Senior Researcher; Yatsiuk M. V.[2], Sc.D., Professor; Onanko A. P.[3], Ph.D., Senior Researcher; Voropai G. V.[2], Sc.D., Professor; Kuzmych S. A.[2], Postgraduate; Dmytrenko O. P.[3], Sc.D., Professor; Naumenko A. P.[3], Ph.D., Senior Researcher; Matzui L.Y.[3], Sc.D., Professor; Pinchuk-Rugal T. M.[3], Ph.D; Rugal A. G.[3], Engineer; Pavlenko O. L.[3], Sc.D., Professor; Bondarchuk T. V.[3], Postgraduate; Popov S. A.[3], Ph.D., Head of laboratory; Kurochka L. I.[3], Head of laboratory..... 74

ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ З РЕГУЛЬОВАНИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ДЛЯ ПОБУДОВИ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА *Васюк В.В., к.т.н., доцент; Коробський В.В., к.т.н., доцент* 76

СТРУКТУРНО-ФУНКЦІОНАЛЬНІ ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ З РЕГУЛЬОВАНИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ *Васюк В.В., к.т.н., доцент; Коробський В.В., к.т.н., доцент* 78

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО РОЗПОДІЛУ НАМАГНІЧЕНОСТІ ПОСТІЙНИХ МАГНІТІВ НА ОСНОВІ ПРИНЦИПУ ВЗАЄМНОСТІ *Жильцов А.В.[1], д.т.н., професор, Березюк А.О.[1], к.т.н., доцент, Гай Г.А.[2], к.пед.н., доцент, Усенко С.М.[2], к.т.н., доцент, Поліщук К.С.[2], аспірант.* 80

ДИНАМІКА ВИДОБУВАННЯ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В СТРУКТУРІ ВИРОБНИЦТВА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НІДЕРЛАНДІВ, ЯК КРАЇНИ-ЛІДЕРА СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ ЄС *Дробін О.А., студент; Грудинін Б.О., д-р пед. наук, доцент, завкафедри фізики* 82

ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ СХЕМИ ЗАМІЩЕННЯ КОМПЕНСОВАНОГО АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА Каплун В.В., д.т.н., професор; Чуєнко Р.М., к.т.н., доцент, Макаревич С.С., к.т.н., доцент..... 83

ОСОБЛИВОСТІ ВИГОТОВЛЕННЯ ОБМОТОК СТАТОРА КОМПЕНСОВАНИХ АСИНХРОННИХ ГЕНЕРАТОРІВ *Каплун В.В., д.т.н., професор, Чуєнко Р.М., к.т.н., доцент, Макаревич С.С., к.т.н., доцент* 84

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЗМУ ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРНОЇ АНІЗОТРОПІЇ В КЛЕЙОВИХ З'ЄДНАННЯХ СТАЛІ ТА АЛЮМІНІЮ ПІД ДІЄЮ МАГНІТНОГО ПОЛЯ *Свирид М. М.[1], к.т.н., доцент; Квач Ю.М.[2], к.т.н., доцент* 85

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ, ЩО ВИНИКАЮТЬ ПІД ЧАС ОБРОБКИ СТІЧНИХ ВОД ВИСОКОВОЛЬТНИМИ ІМПУЛЬСНИМИ

РОЗРЯДАМИ *Олійник Ю.О., аспірант, Заблодський М.М., д.т.н., проф.,* 87
ПОВЕДІНКОВІ ЧИННИКИ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ В СИСТЕМАХ ЕНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТУ *Радько І.П., к.т.н., доцент; Наливайко В. А., к.т.н., доцент; Окушко В. О., к.т.н., доцент; Червінський Л. С., д.т.н., професор* 88
ПРИСТРІЙ ШВИДКОДІЙНОГО ІСКРОЗАХИСТУ ДЖЕРЕЛ ВИСОКОЇ НАПРУГИ *О.В. Окушко[1], П.М. Ковтун[2]* 90
ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТА СТІЙКОСТІ МІКРОМЕРЕЖ НА ОСНОВІ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ *Окушко В. О., к.т.н., доцент; Радько І.П., к.т.н., доцент; Наливайко В. А., к.т.н., доцент; Чередниченко Р.Ю., аспірант* 91
ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ І ПРОГНОЗУВАННЯ СТАНУ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ПОТУЖНІСТЮ ДО 15 кВт *Окушко В. О., к.т.н., доцент; Кишко О.В, магістр* 93
ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ *Наливайко В. А., к.т.н., доцент; Лебеда О., аспірант* 95
СУЧАСНІ ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЇ ВІДНОВЛЕННЯ ІЗОЛЯЦІЇ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ДЛЯ АГРОПРОМИСЛОВОГО КОМПЛЕКСУ *П.М. Ковтун[1], О.В. Окушко[2], Tetiana Knyzhka* 96
РОЗРОБКА СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ДЛЯ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА СТРІЧКОВОГО КОНВЕЄРА *Кириленко Ю.Є., здобувач вищої освіти; Васюк В.В., к.т.н., доцент[1]* 98
УСТАНОВКА ДЛЯ КОНТРОЛЮ РОБОЧИХ ПАРАМЕТРІВ ТА ОЦІНЮВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА *Гайдукевич С.В.[1], старший викладач; Семенова Н.П.[1], старший викладач* 99
РОЗРОБЛЕННЯ ІНТЕГРАЛЬНОГО КОЕФІЦІЄНТА ОДНОРІДНОСТІ ВИКОРИСТАНИХ АКУМУЛЯТОРНИХ КОМІРОК $LiFePO_4$ ДЛЯ ФОРМУВАННЯ БАТАРЕЙ ПОВТОРНОГО ВИКОРИСТАННЯ *Лисіков О.Ю., аспірант, Червінський Л.С. д.т.н., професор,* 101
ЗАХОДИ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ *Нижник В.О., студент; Радько І.П., к.т.н., доц.* 103
РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ ІНФРАЧЕРВОНОГО ОБІГРІВУ ТЕЛЯТ *Червінський Л.С. д.т.н., професор;, Швиденко І.В., магістр* 104
ВПЛИВ РЕЖИМУ РОБОТИ ДВИГУНА НА ДИНАМІЧНІ Й ЕНЕРГЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАСОСНОГО АГРЕГАТУ *Гузенко В.В.[1,2], к.т.н., доцент; Чаусов С.В.[2], к.т.н., доцент;* 106
МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ НАФТОГАЗОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ *Курляк П.О., к.т.н., доцент* 108

РОЗРОБЛЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНОЇ СИСТЕМИ МІКРОКЛІМАТУ В ПТАШНИКУ З ІОНІЗАЦІЄЮ ПОВІТРЯ *Червінський Л.С. д.т.н., професор;, Кутовий Д.Л. ., магістр* 109
АНАЛІЗ ВПЛИВУ КРОКУ ДИСКРЕТИЗАЦІЇ НА ВИНИКНЕННЯ РОЗБІЖНОСТЕЙ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ЗНАЧЕНЬ АКТИВНОЇ ТА РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТЕЙ ДОБОВИХ ГРАФІКІВ НАВАНТАЖЕНЬ. *О.А. Босенко, аспірант; В.Є. Кривоносов, д.т.н., професор* 111
СМАРТ-ТЕХНОЛОГІЇ У СВІТЛОКУЛЬТУРІ РОСЛИН *Червінський Л.С, д.т.н., професор, Окушко О.В., к.т.н., доцент, Радько І.П., к.т.н., доцент* 113
ОПТИМІЗАЦІЯ ІНТЕГРАЦІЇ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНИХ ДЖЕРЕЛ ГЕНЕРАЦІЇ В СИСТЕМИ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КРИТИЧНИХ ОБ'ЄКТІВ З УРАХУВАННЯМ МІЖНАРОДНОГО ДОСВІДУ *аспірант, Поліщук Р.Ф. д.т.н., проф. Шворов С.А.* 115
ВПЛИВ МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА ПОСІВНІ ЯКОСТІ НАСІННЯ ТЕХНІЧНИХ КУЛЬТУР *Савченко В.В., к.т.н., доцент; Демидко В. Ю., студент магістратури* 116
АВТОМАТИЧНЕ КЕРУВАННЯ ДОЗУВАННЯМ СОКОВИТИХ КОРМІВ *Савченко В.В., к.т.н., доцент; Санченко О.В., к.т.н., доцент; Лось Я.О., студент магістратури* 118
ОБРОБКА ЖИВИЛЬНИХ РОЗЧИНІВ У ПОЛІ КОРОННОГО РОЗРЯДУ *Синявський О. Ю., к.т.н., доцент; Богославець О. Р., студент магістратури* 120
СВІТЛОДІОДНА СИСТЕМА ОПРОМІНЕННЯ РОСЛИН У ЗИМОВІЙ ТЕПЛИЦІ *Синявський О. Ю., к.т.н., доцент; Бузаєва А.А., студентка магістратури* 122
РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ ІНФРАЧЕРВОНОГО ОБІГРІВУ ТЕЛЯТ *Червінський Л.С. д.т.н., професор;, Швиденко І.В., магістр* 123
ОЦІНКА МАНЕВРЕНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ТЕЦ В ПЕРІОД ПІСЛЯВОЄННОЇ ВІДБУДОВИ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ГРАФІКІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ОЕС УКРАЇНИ *Щербина Є.В., к.т.н.; Тесленко О.І., к.т.н., ст. досл.* 125
ЦИФРОВИЙ ЕНЕРГОМОНІТОРИНГ І ПРОГНОЗУВАННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ В СИСТЕМІ SMART CAMPUS *Наливайко В. А., к.т.н., доцент; Радько І.П., к.т.н., доцент; Окушко В. О., к.т.н., доцент; Червінський Л. С., д.т.н., професор* 126
ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АВТОНОМНОЇ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ *Чуєнко Р.М., к.т.н., доцент; Дужик В.В., студент* 128
ОБГРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ НИЗЬКООБЕРТОВИХ ГЕНЕРАТОРІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ У ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВКАХ *Чуєнко Р.М., к.т.н., доцент, Чернишенко А.С., студент* 129

ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ЯК ЧИННИК НАДІЙНОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ *Радько І.П., к.т.н., доцент; Наливайко В. А., к.т.н., доцент; Окушко В. О., к.т.н., доцент; Червінський Л. С., д.т.н., професор* 130
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИЙ МОНІТОРИНГ І ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ В СИСТЕМАХ MICROGRID *Окушко В. О., к.т.н., доцент; Радько І.П., к.т.н., доцент; Наливайко В. А., к.т.н., доцент; Червінський Л. С., д.т.н., професор* 131
ПРОГНОЗУВАННЯ ВИРОБІТКУ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ У MICROGRID *Н.М. Білоус [1], Д.С. Сорокін [2]* 133
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ СПАЛЮВАННЯ НЕСТАНДАРТИЗОВАНОГО БІОПАЛИВА У ТЕПЛОГЕНЕРАТОРАХ *Загородній Р. І., к.т.н., доцент*..... 135
СЕКЦІЯ 2. ПРОЦЕСИ В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ ТА СИСТЕМАХ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ ВІДНОВЛЮВАНИХ І НЕТРАДИЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ 138
ОЦІНЮВАННЯ НАДІЙНОСТІ ІЗОЛЬОВАНИХ МІКРОМЕРЕЖ ІЗ НАКОПИЧУВАЧАМИ ЕНЕРГІЇ ЗА ПОКАЗНИКАМИ ДЕФІЦИТУ ПОТУЖНОСТІ *Давидков А. В., аспірант* 138
МАЛА ГІДРОЕНЕРГЕТИКА В УМОВАХ ТРАНСФОРМАЦІЇ ЕНЕРГЕТИЧНОГО СЕКТОРУ УКРАЇНИ *Бабич М. І., к.т.н., доцент* 139
PERFORMANCE EVALUATION OF METAHEURISTIC MPPT ALGORITHMS FOR PHOTOVOLTAIC SYSTEMS *Dubovyk Volodymyr[1], senior lecturer; Honcharuk Illia[2], student; Chernetskyi Mykhailo[3], student* 141
PHOTOVOLTAIC SYSTEMS USING A SEARCH ALGORITHM UNDER PARTIAL SHADING CONDITIONS *Dubovyk Volodymyr[1], senior lecturer; Dushenok Polina[2], student; Forkosh Kostiantyn[3], student* 143
ADVANCED LEARNING FOR FORECASTING IN WIND ENERGY *Dubovyk Volodymyr[1], senior lecturer; Bobyr Ruslan[2], student; Khilyuk Anya[3], student* 145
BIDIRECTIONAL WIRELESS POWER TRANSFER AND CONTROL METHODS IN V2G SYSTEMS *Gorodetskyi Vyktor[1], Associate Professor; Dubovyk Volodymyr[2], senior lecturer; Olenchenko Dmytro[3], student* 147
МАГНІТНЕ ПОЛЕ СПРОЩЕНИХ ГЕОМЕТРИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ГЕНЕРАТОРА З ВНУТРІШНІМИ ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ Крищук Р. С., к.т.н. 149
METHOD FOR SHORT-TERM LOAD FORECASTING OF CHARGING STATIONS *Shovkaliuk Maryna[1], Associate Professor; Dubovyk Volodymyr[2], senior lecturer; Levchuk Mykhailo[3], student* 151
ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ІНТЕГРАЦІЇ СОНЯЧНОЇ ТА ВІТРОВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ В РОЗПОДІЛЕНІ СИСТЕМИ

ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ *Федірко М. М., к.е.н., доцент.* 153
ASSESSMENT OF GRAPE BIOMASS METHANE POTENTIAL FOR THE DESIGN OF WINERY-BASED BIOGAS SYSTEMS *Witaszek K.[1*]; Kupryaniuk K.[1]; Dudnyk A.[2]; Czekała W.[1]* 154
ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СТІЙКОСТІ УКРАЇНИ НА ОСНОВІ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ГЕНЕРАЦІЇ ЕНЕРГІЇ З НИЗЬКОРЕАКЦІЙНИХ ПАЛИВ *Федорейко В. С., д.т.н., професор* 155
ГІБРИДНІ МІКРОМЕРЕЖІ ТА БАГАТОРІВНЕВЕ РЕЗЕРВУВАННЯ ЯК ОСНОВА ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СТІЙКОСТІ КРИТИЧНИХ ОБ'ЄКТІВ *Мейш Ю. А., д. техн. н., професор Дащенко М.Р., студент* 156
ЕНЕРГЕТИЧНІ ПОКАЗНИКИ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНОЇ УСТАНОВКИ ЗА РІЗНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ТА ЯКІСТЬ НАПРУГИ В АВТОНОМНОМУ РЕЖИМІ *Горобець Ю.Г., аспірант; Горобець В.Г., д.т.н., проф.,* 158
ПЕРСПЕКТИВНІ НАПРЯМИ РОЗВИТКУ АГРОФОТОВОЛЬТАЇКИ В УКРАЇНІ ТА СВІТІ *Коваленко Л.Р. к.т.н., доцент; Коваленко О.І. к.т.н., доцент, Фесенко О.В., аспірант* 161
МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГОБАЛАНСУ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ГІБРИДНОЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СИСТЕМИ З НАКОПИЧУВАЧЕМ ЕНЕРГІЇ В УМОВАХ ТРИВАЛИХ ВІДКЛЮЧЕНЬ *Маланчук М. С., студент* 163
РОЗПОДІЛЕНА ГЕНЕРАЦІЯ ТА НАКОПИЧУВАЧІ ЕНЕРГІЇ У ВІДНОВЛЕННІ ЕНЕРГОСИСТЕМИ УКРАЇНИ *Мейш Ю. А., д. техн. н., професор Самар Т.С., студент* 165
ВИБІР СКЛАДУ ОБЛАДНАННЯ АВТОНОМНОЇ ГІБРИДНОЇ СИСТЕМИ «ФЕС – АБ – ДГ» ЗА МІНІМУМОМ ПРИВЕДЕНИХ ВИТРАТ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ *Варивода Є. С., здобувач вищої освіти; Павленко В. М., к.т.н., доцент* 166
ВИБІР КОЕФІЦІЄНТА SOC-АДАПТАЦІЇ DROOP-КЕРУВАННЯ НАКОПИЧУВАЧІВ РІЗНОЇ ЄМНОСТІ В ОСТРІВНІЙ МІКРОМЕРЕЖІ *Васільєв М. М., здобувач вищої освіти; Павленко В. М., к.т.н., доцент* 168
ДОПУСТИМА ПОТУЖНІСТЬ ПРИЄДНАННЯ ФОТОІНВЕРТОРІВ ДО МЕРЕЖІ 0,4 КВ ЗА ПОКАЗНИКАМИ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ТА СПОСОБИ ЗНИЖЕННЯ ГАРМОНІК *Крегул Б. Ю., здобувач вищої освіти; Павленко В. М., к.т.н., доцент* 170
СТІЙКІСТЬ ВИБОРУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПОТУЖНОСТІ ПЕЛЕТНОЇ МІКРОТЕЦ ІЗ ДВИГУНОМ СТІРЛІНГА ДО ПРІОРИТЕТІВ КРИТЕРІЇВ ОЦІНЮВАННЯ *Нікітін Є. С, аспірант; Павленко В. М., к.т.н., доцент* 172
ОБҐРУНТУВАННЯ РЕЖИМУ РОБОТИ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРА В

КОМБІНОВАНІЙ СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ ЛОКАЛЬНОГО ОБ'ЄКТА З НАКОПИЧУВАЧЕМ ЕНЕРГІЇ *Степанюк О., здобувач вищої освіти; Макаревич С. С., к.т.н., доцент* 174
ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРИБИРАННЯ ТВАРИННИЦЬКИХ ПРИМІЩЕНЬ *Соловей І. М., к.т.н., доцент*..... 176
РОЗПОДІЛ ВІДПОВІДАЛЬНОСТІ ЗА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ Станішевський Г. Г, Трунова І. М., к.т.н., доцент..... 177
ОСНОВНІ ЧИННИКИ ВИНИКНЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ВТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ ТА ШЛЯХИ ЇХ МІНІМІЗАЦІЇ *Кравчук О.А.1, здобувач вищої освіти 2-го курсу ОС «Магістр» спеціальності G3 «Електрична інженерія»* 179
ОЦІНКА ПРОЦЕСІВ ЗАВАНТАЖЕНОСТІ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ, ЯК ОСНОВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ *Николин П.М. асистент; Николин У.М., к.т.н., доцент* 181
МОДЕЛЮВАННЯ КОРОТКИХ ЗАМИКАНЬ У ДОВІЛЬНІЙ ТОЧЦІ ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ НА ОСНОВІ РІВНЯНЬ ДОВГОЇ ЛІНІЇ *Левонюк В. Р., к.т.н., доцент* 183
ВПЛИВ ЗАКРИЛОК І КОНФУЗОРА НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВІТРОГЕНЕРАТОРА З ВЕРТИКАЛЬНОЮ ВІССЮ ОБЕРТАННЯ *Баліцький А. С., аспірант; Троханяк В. І., к.т.н., доцент*..... 185
АГЕНТНА МОДЕЛЬ КЛАСТЕРНОЇ МІКРОМЕРЕЖІ З ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЮ ГЕНЕРАЦІЄЮ, НАКОПИЧЕННЯМ ТА МІЖКЛАСТЕРНИМ ОБМІНОМ ЕНЕРГІЄЮ Красенко А. О., здобувач вищої освіти гр. АСД-ЕІ25; Бодунов В. М., к.т.н., доцент, науковий керівник 187
ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ПІД ЧАС ПРОВАЛІВ НАПРУГИ В ЕЛЕКТРИЧНІЙ МЕРЕЖІ З ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЮ СТАНЦІЄЮ *Варецький Ю.О., д.т.н., професор; Максимук О.І., аспірант* 189
ЕНЕРГЕТИЧНИЙ КРИТЕРІЙ ДОЦІЛЬНОСТІ АКТИВНОЇ ІОНІЗАЦІЇ В СИСТЕМАХ ВІДБОРУ АТМОСФЕРНОЇ ЕЛЕКТРИКИ *Лисак О. О., аспірант; Мошноріз М. М., к.т.н., доцент*..... 191
МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ФОТОВОЛЬТАЇЧНИХ СИСТЕМ З НАКОПИЧУВАЧЕМ ЕНЕРГІЇ В ЛОКАЛЬНИХ ЕНЕРГОСИСТЕМАХ МАЛИХ НАСЕЛЕНИХ ПУНКТІВ *Лукач А. А.[1], аспірант; Сабо А. Г.[1], к.т.н., доцент*..... 193
КОНЦЕПЦІЯ ВІДБОРУ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПОВІТРЯ ПТАШНИКІВ ДЛЯ РЕКУПЕРАЦІЇ ЕНЕРГІЇ З ВЕРТИКАЛЬНО-ОСЬОВИМИ ВІТРОТУРБІНАМИ *Мартинюк О.В., аспірант Троханяк В.І., канд. техн. наук, доцент* 194
ОСОБЛИВОСТІ ВИБОРУ ГІБРИДНИХ ІНВЕРТОРІВ ДЛЯ ОСТРІВНОГО РЕЖИМУ СИСТЕМИ МІКРОГЕНЕРАЦІЇ

БАГАТОКВАРТИРНОГО БУДИНКУ *Петрова К. Г., к.т.н., доцент; Дигас Р. Г., здобувачка вищої освіти* 196
ТЕХНІЧНІ ОБМЕЖЕННЯ ТА УМОВИ ІНТЕГРАЦІЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ У РОЗПОДІЛЬНІ МЕРЕЖІ *Потапенко М.В., к.т.н., доцент; Шаршонь В.Л., старший викладач* 198
ПІДВИЩЕННЯ СТАБІЛЬНОСТІ ГЕНЕРАЦІЇ ЕНЕРГОУСТАНОВОК З ВІДНОВЛЮВАЛЬНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ *Рамш В.Ю., к.т.н., доцент; Потапенко М.В., к.т.н., доцент* 200
КОМПЛЕКСНА МОДЕРНІЗАЦІЯ ВІДКРИТОГО РОЗПОДІЛЬЧОГО ПРИСТРОЮ 220 КВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТЕПЛОВОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ *Семенов А. О.[1], канд. фіз.-мат. наук, доцент; Семенова Н. В.[2]* 202
ОПТИМІЗАЦІЯ СКЛАДУ, ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ТА КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ ТВЕРДОГО ПАЛИВА З ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ І ДЕРЕВНИХ ПЕЛЕТ *Чупа В. М., доктор філософії, доцент* 204
УЗГОДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО РЕЗЕРВУ ТА СТРУМОВИХ ОБМЕЖЕНЬ ІНВЕРТОРА ПРИ ПЕРЕХОДІ ЛОКАЛЬНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СИСТЕМИ В ОСТРІВНИЙ РЕЖИМ *Тоберт М. Ю., аспірант; Мороз О. М., д.т.н., професор* 206
ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ПРИВАТНОГО БУДИНКУ ЗА РАХУНОК ГІБРИДНОЇ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ З НАКОПИЧЕННЯМ ЕНЕРГІЇ *Шван А., студент; Яцун О., канд. фіз.-мат. наук, асистент* 208
ОПТИМІЗАЦІЯ ПОТОКОРОЗПОДІЛУ ПОТУЖНОСТІ В МІКРОМЕРЕЖІ З РОЗПОДІЛЕНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІ *Олійніченко М. Ю., здобувач третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти, Бялобржеський О. В., к.т.н., доцент,* 210
ФІЗИЧНІ МОДЕЛІ ПРОГНОЗУВАННЯ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ *Герасименко В. П., к. т. н., доцент; Майбородіна Н. В., к. ф.-м. н., доцент* 212
ВИВЧЕННЯ СИНУСОЇДАЛЬНИХ СИГНАЛІВ В КУРСІ ПІДГОТОВКИ МАЙБУТНІХ ІНЖЕНЕРІВ-ЕНЕРГЕТИКІВ *Матюшенко М.С., студент; Грудинін Б.О., д-р пед. наук, доцент, завкафедри фізики* 213
ВТРАТИ ЕНЕРГІЇ ПІД ЧАС КОМУТАЦІЇ В ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПУСКАЧАХ *Коробський В.В., к.т.н., доцент; Денисенко В.Ю., студент-магістр; Коробська О.В., студентка* 215
ІСНУЮЧІ МЕТОДИ ДІАГНОСТИКИ СИЛОВИХ КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЙ НАПРУГОЮ 10 кВ *Коробський В.В., к.т.н., доцент; Скороход О.С., студент-магістр; Коробська О.В., студентка* 216
КРИТЕРІЇ ПРОГНОЗУВАННЯ РОЗВИТКУ ВІТРОВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ *Майбородіна Н. В., к. ф.-м. н., доцент; Герасименко В. П., к. т. н.,*

доцент 218
ОСОБЛИВОСТІ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ З ВИСОКОЮ ЧАСТКОЮ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ *Гуменна М. О. студентка, Гребенюк Т.В., к.т.н., доцент*..... 219
INVESTIGATION OF THE PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES AND ELECTRO-EROSION WEAR RESISTANCE OF RESTORED CONTACTS FOR ELECTROMAGNETIC STARTERS Reshetiuk V.M.[1], PhD, Associate Professor; Korobskyy V.V.[2], PhD, Associate Professor; Vasiuk V.V.[3], PhD, Associate Professor 221
ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ MICROGRID З УРАХУВАННЯМ ЕКОНОМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ *Білоус Н.М. аспірант, Сорокін Д.С. к.т.н., доцент* 223
УЗГОДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РОБОТИ КОНДЕНСАТОРНОЇ УСТАНОВКИ ТП 10/0,4 КВ ІЗ ГІБРИДНОЮ СИСТЕМОЮ ЗБЕРІГАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ *Петренко А.В., к.т.н., доцент; Забіяка Д.О., аспірант* 225
ОПТИМІЗАЦІЯ РОБОТИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ, ЩО ПРАЦЮЄ НА ЩЕПІ *Доповідач слухач аспірантури ННІ ЕАЕ Чайка В.В. Науковий керівник – к.т.н., доц., Радько І.П* 227
ОПТИМІЗАЦІЯ ГІБРИДНОЇ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ ІЗ СИСТЕМОЮ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ЕНЕРГОНЕЗАЛЕЖНОСТІ ПРИВАТНОГО ДОМОГОСПОДАРСТВА *Швець Олег, студент, Яцун Остап, канд. Фіз.-мат. наук, асистент*..... 228
СЕКЦІЯ 3 ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА 232
УПРАВЛІННЯ СТІЙКІСТЮ ЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ГРОМАДИ ПІД ЧАС ЗНЕСТРУМЛЕНЬ *Нижниченко О. С., здобувач другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальність D4 «Публічне управління та адміністрування», Нижниченко Я. Є., канд. екон. наук, доцент, доцент кафедри економіки підприємства та організації підприємницької діяльності* 232
ВПЛИВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ НА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ІНДУКЦІЙНОЇ ТИГЕЛЬНОЇ ПЕЧІ З ТИРИСТОРНИМ ПЕРЕТВОРЮВАЧЕМ ЧАСТОТИ *Усенко С. М., к.т.н., доцент; Зозуля В.О. аспірант* 233
МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОМАСООБМІННИХ ПРОЦЕСІВ В КАНАЛАХ РОТОРНО-ПУЛЬСАЦІЙНОГО АПАРАТУ ДЛЯ ПРИГОТУВАННЯ РІДКИХ КОРМІВ *Сердюк А.М., Ph.D.*..... 235
ДОЦІЛЬНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ЧАСТОТНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА В РОТОРНО-ПУЛЬСАЦІЙНОМУ АПАРАТІ ДЛЯ ПРИГОТУВАННЯ РІДКИХ КОРМІВ *Сердюк А.М., Ph.D.*..... 237
ВИКОРИСТАННЯ ТРУБКИ РАНКА-ХІЛША ЯК АЛЬТЕРНАТИВА ТРАДИЦІЙНОМУ ДРОСЕЛЮВАННЮ НА

ГАЗОРОЗПОДІЛЬНИХ ПУНКТАХ *Сердюк А.М., Ph.D.* 238
АНАЛІЗ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ЕКОЛОГІЧНО ЧИСТИХ СИСТЕМ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ В ІНДИВІДУАЛЬНОМУ БУДІВНИЦТВІ *Постол Ю.О., к.т.н., доцент; Петренко К.Г., ст. викл.* 239
ВИЗНАЧЕННЯ ЕКОНОМІЧНО ДОЦІЛЬНОЇ ТОВЩИНИ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЇ ЗОВНІШНІХ СТІН НА ОСНОВІ МІНІМІЗАЦІЇ СУКУПНИХ ВИТРАТ *Мейш Ю. А., д. техн. н., професор, Хуторний Д.Є., студент* 240
ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЖИТЛОВОГО БУДИНКУ ШЛЯХОМ ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕПЛОВОГО НАСОСА ТА ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ *Шульга Ю. О., студент* 242
ДИСПЕТЧЕРИЗАЦІЇ ІНДИВІДУАЛЬНИХ ТЕПЛОВИХ ПУНКТІВ БУДІВЕЛЬ: АВТОНОМНІ СТРАТЕГІЇ ВІД РЕГУЛЮВАННЯ ДО ПРОГНОЗУВАННЯ *Мартинюк Л. В., старший викладач; Афінович С. Г., аспірант* 244
СЕКЦІЯ 4 АВТОМАТИЗАЦІЯ, ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ ТА РОБОТОТЕХНІКА 246
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЧАСТОТНИЙ АНАЛІЗ АКУСТИЧНИХ КОЛИВАНЬ МЕТАЛЕВИХ РЕЗОНАТОРІВ *Габльовська Н.Я., к.т.н., доцент; Габльовський Б.Б., к.г.н., доцент* 246
SOME FEATURES OF THE LINEAR RANDOM PROCESSES AND FIELDS MATHEMATICAL MODELS APPLICATION fOR VIBRATION DIAGNOSTIC SYSTEMS OF WIND TURBINE COMPONENTS USING A TIME SYNCHRONIZATION SYSTEM *Koval V.[1], Dr.Sci, (Eng), Professor; Zvaritch V. [2], Dr.Sci, (Eng); Samkov O.[2]*, Dr.Sci, *(Eng); Piskun O.[3]; Samkov B.[2]; Kulesh O.[2]* 247
THE IMPACT OF SUBSTRATE EXTRUSION ON THE ENERGY AND ECONOMIC EFFICIENCY OF BIOGAS PLANT OPERATION K. Kupryaniuk, K. Witaszek, W. Czekała and J. Dach 248
ОБҐРУНТУВАННЯ НАПРЯМУ ДОСЛІДЖЕНЬ ЩОДО РОЗРОБКИ СИСТЕМИ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ДЛЯ АГРОХІМІЧНОГО ВИКОРИСТАННЯ ПРОДУКТІВ БІОГАЗОВОГО ВИРОБНИЦТВА *Опришко О.О., к.т.н., доцент, Глущенко О.В, аспірант* 253
ІННОВАЦІЙНІ ПІДХОДИ ДО ДИНАМІЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ СІВБИ В СИСТЕМАХ ТОЧНОГО ЗЕМЛЕРОБСТВА *Іванов І.М.[1], аспірант; Опришко О.О.[1], канд. техн. наук, доцент* 255
ЕМУЛЯЦІЯ СЕНСОРНИХ ДАНИХ ДЛЯ ТЕСТУВАННЯ АВТОНОМНИХ АГРАРНИХ ПЛАТФОРМ У НЕСТРУКТУРОВАНОМУ СЕРЕДОВИЩІ *Голояд Ю.Л., аспірант; Дудник А.О., кандидат технічних наук, доцент* 256
ЗАСТОСУВАННЯ ПРИНЦИПУ ПРАВОЇ СТОРОНИ ДЛЯ ВИДІЛЕННЯ ЗОВНІШНЬОГО КОНТУРУ ПЕРЕШКОДИ *Дудник*

А. О., к.т.н., доцент; Жук Д.Є., аспірант 258
ЦИФРОВИЙ ПРИСТРІЙ ПОЛІФАЗНОГО КОНТРОЛЮ СИНХРОСИГНАЛУ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ *Коваль В.В.[1], д.т.н., професор; Лавінський Д.С.[1]; Осінський О.Л.[3]; Піскун О.М.[1,4]* 260
РЕЗИЛЬЄНТНІСТЬ ЧАСОВО-ЧАСТОТНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СУЧАСНОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКИ І ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ В УМОВАХ ВОЄННОГО СТАНУ *Коваль В.В.[1], д.т.н., професор; Самков О.В.[2], д.т.н., с.н.с.; Вакась В.І.[3], к.т.н.; Піскун О.М.[1,4]; Самков Б.О.[2]* 262
ОЦІНЮВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ЯКОСТІ ТЕЛЕМЕТРІЇ БІОМЕТАНОВОЇ УСТАНОВКИ НА ПЕРИФЕРІЙНОМУ РІВНІ *Бунтов М. І., аспірант; Опришко О. О., к.т.н., доцент* 263
ЕНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТ ГІБРИДНОЇ СТАНЦІЇ «ФЕС – АБ – ДГ» ІЗ ПРОГНОЗУВАННЯМ ГЕНЕРАЦІЇ ТА НАВАНТАЖЕННЯ: ПОРІВНЯННЯ ПРАВИЛ І ПРОГНОЗНОГО КЕРУВАННЯ *Носик Д. В., здобувач вищої освіти; Кругляк Г. В., PhD, Павленко В. М., к.т.н., доцент;* 265
ДВОКРИТЕРІАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ ДОСВІЧУВАННЯМ ТЕПЛИЦІ: ВАРТІСТЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ТА ДОБОВА ДОЗА СВІТЛА ЗА ЗОННОГО ТАРИФУ *Шмигельський Р. М., здобувач вищої освіти; Ликтей В. В., к.т.н., Павленко В. М., к.т.н., доцент;* 267
УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРИФІКАЦІЇ ВИРОБНИЧОГО ЦЕХУ З РОЗРОБКОЮ АВТОМАТИЗАЦІЇ ЛІНІЇ РОЗЛИВУ |*Томілов О.А., здобувач вищої освіти* 269
РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПІДГОТОВКОЮ СУБСТРАТУ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ БІОГАЗУ *Настенко М.О., студентка; Дудник А. О., к.т.н., доцент* 270
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА РАННЬОЇ ДІАГНОСТИКИ ЗАХВОРЮВАНЬ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ ТВАРИН НА ОСНОВІ МЕТОДІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ *Мельник Д. О., аспірант; Кіктєв М. О., к.т.н., доцент* 272
ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АВТОМАТИЗОВАНИЙ КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРІВ АНАЕРОБНОГО ЗБРОДЖУВАННЯ СИРОВИНИ В ЛАБОРАТОРНИХ БІОГАЗОВИХ РЕАКТОРАХ *Племянник В. Р., здобувач вищої освіти; Дудник А. О., к.т.н., доцент* 273
РЕАЛІЗАЦІЯ ВИМІРЮВАННЯ ВОЛОГОСТІ СИПУЧИХ КОМПОНЕНТІВ ПРЕМІКСІВ| *Правілов М.О., аспірант; Кіктєв М.О., к.т.н., доцент* 276
МОДЕЛЮВАННЯ ТА УДОСКОНАЛЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ВОДОПОСТАЧАННЯМ НА ОСНОВІ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ АВТОМАТИЗАЦІЇ *Стеценко С. Ю., студентка; Дудник А.О., к.т.н., доцент* 278
БАГАТОРІВНЕВА АРХІТЕКТУРА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО КЕРУВАННЯ МІКРОКЛІМАТОМ

ПРОМИСЛОВИХ ТЕПЛИЦЬ *Якименко І. Ю., доктор філософії (PhD)* 279
СЕКЦІЯ 5 ІСТОРІЯ ТА ФІЛОСОФІЯ НАУКИ І ТЕХНІКИ. МЕТОДОЛОГІЯ ВИЩОЇ ТЕХНІЧНОЇ ОСВІТИ 282
ПОДВІЙНІ ІНТЕГРАЛИ ЯК ІНСТРУМЕНТ ПЕРЕВІРКИ РОЗРАХУНКІВ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В ЗАДАЧАХ ЕНЕРГЕТИКИ *Гай Г. А., к. пед. н., доцент; Бородійчук Н. О., студент* 282
МАТЕМАТИЧНА СТАТИСТИКА У ВІТРОЕНЕРГЕТИЦІ: ВІД ВИБІРКОВОГО СЕРЕДНЬОГО ДО ПОТУЖНОСТІ ВІТРУ *Гай Г. А., к. пед. н., доцент; Кравець О. В., студент* 284
ТЕОРІЯ ЙМОВІРНОСТЕЙ У ПІДГОТОВЦІ ЕНЕРГЕТИКА В ЕПОХУ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ: ОЦІНЮВАННЯ НАДІЙНОСТІ ГЕНЕРУЮЧОЇ СИСТЕМИ Гай Г. А., к. пед. н., доцент; Тіяра Д. В., студент 286
ВІД ГРАФІКА ДО ОСЦИЛОГРАМИ: ПОСЛІДОВНІСТЬ ВИВЧЕННЯ СИНУСОЇДАЛЬНОГО СИГНАЛУ В ІНЖЕНЕРНІЙ ПІДГОТОВЦІ *Грудинін Б. О., д. пед. н., доцент; Мейш Ю. А., д. техн. н., професор, Гай Г. А., канд. пед. н., доцент* 287
ОСОБЛИВОСТІ ПРОВЕДЕННЯ БЕЗКОШТОВНИХ КУРСІВ З ФІЗИКИ ДЛЯ СТУДЕНТІВ ПЕРШОГО КУРСУ БАКАЛАВРАТУ |*Грудинін Б. О., д. пед. н., доцент*; 289
ОДНА МАТРИЦЯ – БАГАТО СЦЕНАРІЇВ: МАТРИЧНИЙ РОЗРАХУНОК НАПРУГ І ВТРАТ У РОЗПОДІЛЬНІЙ ЕЛЕКТРИЧНІЙ МЕРЕЖІ *Мейш Ю. А., д. техн. н., професор Дробін О.А., студент* 291
ЕВОЛЮЦІЯ ПІДХОДІВ ДО ВІДБОРУ ЕНЕРГІЇ АТМОСФЕРНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ: ВІД ПРОМИСЛОВИХ ОЧІКУВАНЬ ДО АВТОНОМНОГО ЖИВЛЕННЯ *Лисак О. О., аспірант; Мошноріз М. М., к.т.н., доцент* 293
АДАПТАЦІЯ ТИПОВИХ ІНЖЕНЕРНИХ РОЗРАХУНКІВ ДО ВИМОГ СЬОГОДЕННЯ І.М. Трунова,к.т.н., доцент 294
ПОВЕРХНЕВІ ІНТЕГРАЛИ В РОЗРАХУНКАХ МАГНІТНОГО ПОТОКУ ТА ТЕПЛОВИХ ВТРАТ *Мейш Ю. А., д. техн. н.; професор Чередніченко С. С., студент* 296

СЕКЦІЯ 1.
СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ ТА ЦИФРОВА ЕНЕРГЕТИКА: ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА, ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЇ ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ.

UDC 621.311.1:621.316

A MULTILEVEL METHOD FOR ASSESSING THE EFFECTIVENESS OF AN EMS FOR A LOCAL THREE-PHASE ELECTRICAL FACILITY

O. V. Okushko, PhD in Engineering, Associate Professor; R. Yu. Cherednychenko, PhD Student

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

The evolution of energy management systems (EMS) from monitoring towards forecasting and automated control requires a comprehensive assessment of the consequences of control actions [1, 2]. For a local three-phase electrical facility, lower electricity costs do not necessarily indicate improved effectiveness: load shifting may cause phase overloads, poorer power quality, or increased equipment wear [2, 3].

The aim of this study is to substantiate a multilevel method for assessing the effectiveness of EMS-based electricity consumption control while distinguishing the performance of a control strategy from its mandatory technical feasibility.

The study considers a local 0.4 kV three-phase electrical system bounded by its point of common coupling. It comprises monitored and controllable loads, local generation, a battery energy storage system (BESS), switching and protective devices, measuring instruments, and an EMS. The baseline operating mode and alternative control strategies are compared under identical system boundaries, time intervals, and external conditions.

The method employs systems analysis, structural-functional decomposition, discrete-time and scenario modelling, key performance indicator (KPI) normalization, weighting by AHP and CRITIC, multicriteria aggregation, and sensitivity analysis [4, 5]. The KPIs are divided into five groups (Fig. 1): energy and economic (consumption, cost, peak power); electrical and technical (phase currents, unbalance, losses, power quality); reliability (continuity of supply to critical loads); resource and operational (switching operations, BESS condition and degradation); and algorithmic and informational (data quality, latency, and command execution).

Each KPI is documented in a standardized specification defining its physical meaning, unit, calculation method, optimization direction, baseline, target and maximum permissible values, time horizon, and data source. This distinguishes performance targets from mandatory electrical and equipment-related constraints.

The proposed assessment sequence is as follows: definition of the facility boundaries; verification of measurement completeness, reliability and time alignment; technical feasibility checks; KPI normalization; determination of weights and group scores; calculation of an overall index; and sensitivity analysis.

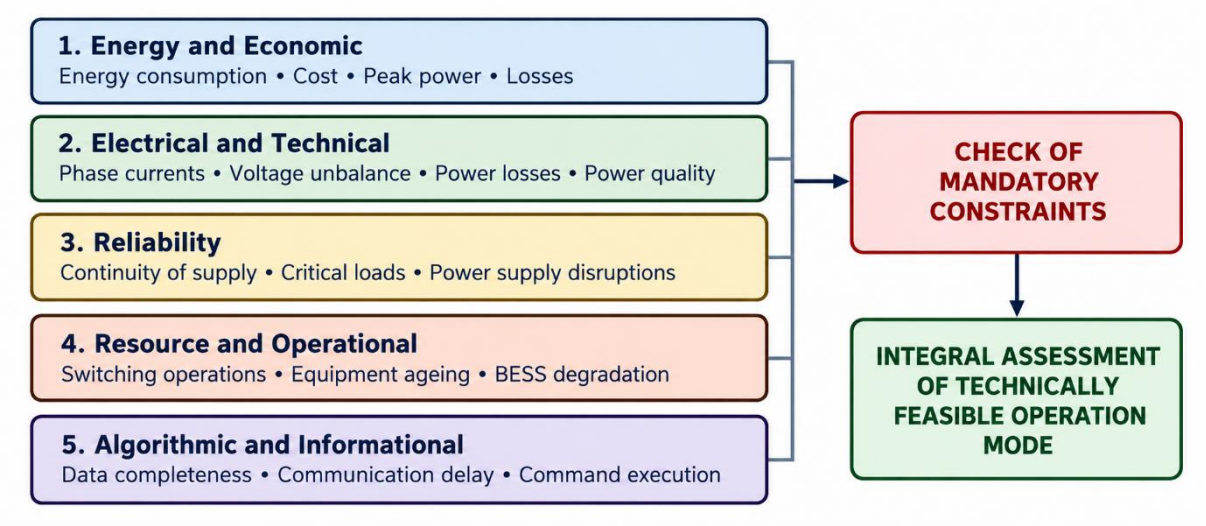


Fig. 1. Multilevel framework for assessing EMS effectiveness

The resulting procedure prevents a favorable energy or economic outcome from compensating for a technically unacceptable operating mode. Preliminary methodological verification using a controlled model example confirmed the logical consistency of the calculation sequence but did not experimentally demonstrate EMS effectiveness at a real facility. Further work should validate the method using measured data from local three-phase facilities and examine the robustness of alternative rankings to changes in criterion weights.

References

1. Okushko O. V., Cherednychenko R. Yu. Architectural and functional principles of intelligent electricity consumption management for a local facility within an energy management system. Digital Technologies in Energy and Automation: Proceedings of the 4th International Scientific and Practical Conference. Kyiv: NULES of Ukraine, 2026. pp. 298–299. https://drive.google.com/file/d/1l-YxWlVITsyXY2k1rnVOMH5k_T7l809m/view.

2. Eyimaya S. E., Altin N. Review of energy management systems in microgrids. Applied Sciences. 2024. 14(3), 1249. https://doi.org/10.3390/app14031249.

3. Ivanov O., Băiceanu F., Nemeș C.-M., Gavrilaș M. A multistage algorithm for phase load balancing in low-voltage electricity distribution networks operated in asymmetrical conditions. Symmetry. 2025. 17(10), 1589. https://doi.org/10.3390/sym17101589.

4. Petrichenko L., Mutule A., Hlusovs S., Zarins R., Novosads P., Diahovchenko I. Multi-criteria decision analysis framework for evaluating tools supporting renewable energy communities. Sustainability. 2026. 18(1), 29. https://doi.org/10.3390/su18010029.

5. Kotsar O. V., Dovhyi S. S. Improving the performance of SME energy management systems through energy-monitoring data management. Energy: Economics, Technology, Ecology. 2025. (2), 7–11 [in Ukrainian]. https://doi.org/10.20535/1813-5420.2.2025.327133.

УДК 621.313.1.13

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЛІНІЙНИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ

Габльовська Н.Я., к.т.н., доцент; Шиндак Л.М., асистент; Нестерук М.О. студент групи КІ-26-1

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

м.Івано-Франківськ, Україна

Сучасний розвиток автоматизованих електроприводних систем потребує підвищення ефективності виробництва, зниження енерговитрат та спрощення кінематичних ланцюгів. Традиційне використання двигунів обертального руху для приводу механізмів з поступальним рухом вимагає застосування проміжних механічних передач (кривошипно-шатунних, рейкових, гвинтових тощо), що ускладнює конструкцію та знижує загальний ККД. Перспективним рішенням цієї проблеми є впровадження прямих приводів на базі електричних машин лінійного переміщення.

Метою роботи є дослідження особливостей застосування лінійних електродвигунів (ЛЕД) у різних галузях техніки, аналіз їхніх конструкційних різновидів та вивчення методів розрахунку основних електричних і силових параметрів.

У роботі проаналізовано переваги лінійних двигунів, серед яких виділяються висока точність позиціонування (нанометровий діапазон), досягнення кінцевих швидкостей до 9м/с, відсутність механічного зносу, компактність, надійність та можливість реалізації складних законів керування. Розглянуто конструктивні особливості ключових типів лінійних машин: асинхронних (ЛАД), вентильних із феромагнітним і немагнітним якорем, а також спеціалізованих коливальних і поршневих систем (зокрема вібраторів та лінійних генераторів з вільним поршнем) [1].

Особливу увагу приділено математичному моделюванню та розрахунку параметрів лінійних синхронних двигунів (ЛСД) для високошвидкісного наземного транспорту з магнітною підвіскою (маглев). Отримані в [1] співвідношення дозволяють розраховувати робочі характеристики при довільному характері навантаження та напруги на затискачах шляхової обмотки. Проведені дослідження підтверджують доцільність широкого промислового впровадження лінійних двигунів у транспортних системах та енергетиці як ефективної альтернативи традиційним приводам.

Перелік джерел посилань

1. Габльовська Н.Я., Павленко Т.П., Кубієвич Ю. Особливість використання лінійних двигунів та методи розрахунку параметрів // International Science Journal of Engineering & Agriculture2023; 2(4): 58-70с.

УДК 631.364:621.311.243

ГЕОМЕТРИЧНИЙ АНАЛІЗ ПРОСТОРОВОЇ ОРІЄНТАЦІЇ ПЛОЩИНИ СТЕЖЕННЯ ЗА СОНЦЕМ ДЛЯ ПОВІТРЯНОГО КОЛЕКТОРА

Коробка С. В., к.т.н., доцент; Стукалець І. Г., к.т.н., доцент

Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій ім. С. З. Ґжицького, Львів, Україна

Ефективність повітряного колектора для геліосушарки залежить від

інтенсивності випромінювання на сприймальній поверхні [1]. Використання системи стеження з обертанням навколо полярної осі зі швидкістю ω = 15°/год дає змогу оптимізувати орієнтацію колектора, а геометричний аналіз його інсоляції з урахуванням положення Сонця та просторових кутів забезпечує визначення умов опромінення протягом світлового дня (рис. 1).

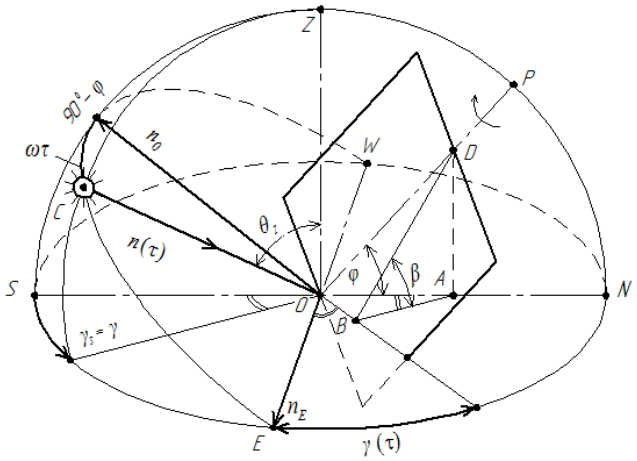


Рисунок 1 – Геометрична схема інсоляції стежної поверхні повітряного колектора з полярно-поворотним механізмом у період рівнодення.

Стежна поверхня повітряного колектора конструктивно поєднана з віссю обертання таким чином, що в момент сонячного полудня її нахил до горизонтальної площини дорівнює географічній широті φ, а азимутальний кут становить γ = 0°. Під час сходу та заходу Сонця азимутальний кут змінюється до γ = ±90°, а кут нахилу до горизонту досягає β = 90°.

У період рівнодення зазначені параметри визначають закономірності зміни просторової орієнтації стежної поверхні повітряного колектора протягом світлового дня:

$$\delta = 0;\ \gamma(\tau) = \gamma_s(\tau);\ \beta(\tau) = \theta_z(\tau) \text{ і } \theta = 0. \qquad (1)$$

Оскільки β(τ) = θz(τ), азимут поверхні визначається з геометричних співвідношень схеми (рис. 1): AB ⊥ OB; OB ⊥ DB; OAB = γ, звідки tgβ = AD/AB, AD = AO·tgφ, AB = AO·cosγ [1].

$$\operatorname{tg}\beta(\tau) = \frac{\operatorname{tg}\varphi}{\cos\gamma(\tau)}. \qquad (2)$$

$$\cos\gamma = \cos\gamma_s = \frac{\cos\theta_z \sin\varphi - \sin\delta}{\sin\theta_z \cos\varphi}\Big|_{\delta=0} = \frac{\cos\theta_z \sin\varphi}{\sin\theta_z \cos\varphi}\Big|_{\theta_z=\beta} = \frac{\operatorname{tg}\varphi}{\operatorname{tg}\beta}. \qquad (3)$$

Схему інсоляції стежної поверхні повітряного колектора для різних періодів року наведено на рис. 2, де сезонні положення Сонця характеризуються кутами θ_{zE} і θz_δ, а сонячне схилення – δ. Сферичний трикутник Z_{CE}, C_δ відображає взаємне положення Сонця та нормалі поверхні, траєкторії яких збігаються під час рівнодення та відрізняються на кут δ в інші періоди року. Синхронне обертання зі швидкістю ω = 15°/год забезпечує рівність азимутів Сонця і стежної поверхні $\gamma = \gamma_{sE}$, тоді як кут освітлення поверхні, суміщеної з полярною віссю, дорівнює поточному сонячному схиленню δ.

$$\theta = \delta = \text{const}. \qquad (4)$$

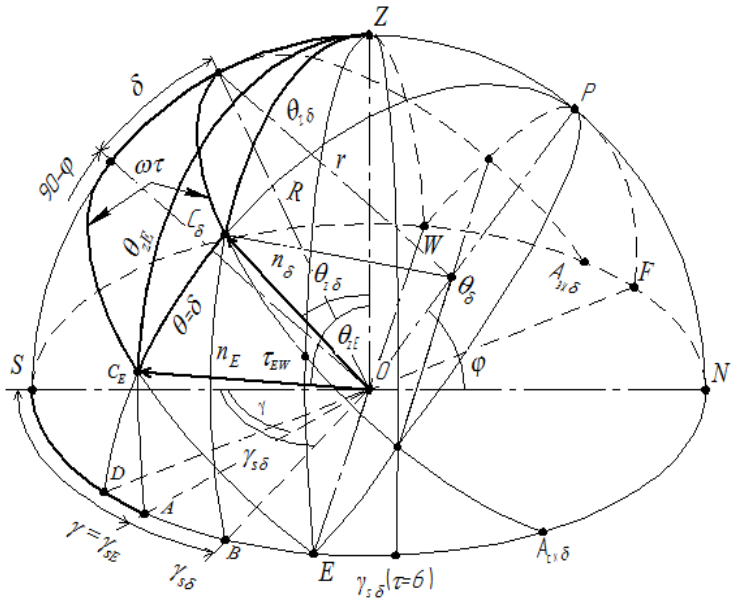


Рисунок 2 – Геометричні характеристики кутової орієнтації стежної поверхні повітряного колектора за умов рівнодення та літнього сонцестояння ($\delta \geq 0$).

Зменшити кут освітлення до нуля можна відхиленням стеженої поверхні від полярної осі на кут δ, при цьому в полудень літнього сонцестояння $\beta = \varphi - \delta$, а під час сходу та заходу Сонця $\beta = 90°$. Така корекція забезпечує наближення одновісного пристрою до двокоординатного стеження з регулюванням кута не частіше одного разу на добу. Дзеркальні полярно-поворотні системи застосовують для спрямованого опромінення нерухомих об'єктів, зокрема геліосушарок, обертаючи відбивачі з подвійною кутовою швидкістю Сонця. Їхня енергетична ефективність залежить від інтенсивності випромінювання, оптичних характеристик дзеркал, геометрії системи та кутів падіння і відбиття променів.

Перелік джерел посилання

1. Knaga J., Tatomyr A., Babych M., Korobka S. Substantiation of the effectiveness of using a flat mirror concentrator in the solar dryer. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 6, No. 8 (90). P. 47–53. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.112206.

УДК 628.4:620.9:338.2

ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ОБ'ЄКТІВ ІНФРАСТРУКТУРИ УПРАВЛІННЯ ВІДХОДАМИ: ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНІ МЕХАНІЗМИ ЗНИЖЕННЯ ЕНЕРГОЗАЛЕЖНОСТІ

Нижниченко Я. Є., канд. екон. наук, доцент

Одеський національний економічний університет, м. Одеса, Україна

Енергетична ефективність об'єктів інфраструктури управління відходами набуває особливого значення в умовах нестабільного електропостачання, зростання вартості енергоресурсів і необхідності безперервного виконання екологічно значущих операцій. Сортувальні комплекси, перевантажувальні станції, об'єкти механіко-біологічного оброблення та полігони мають різну структуру енергоспоживання, проте залежать від функціонування

електроприводів, насосного, вентиляційного, контрольного й допоміжного обладнання. Відтак енергозалежність цих об’єктів слід розглядати не лише як витратну характеристику, а і як чинник стійкості всієї системи управління відходами. Це узгоджується із завданнями ефективного використання ресурсів і належної організації операцій з управління відходами [1].

Поширений підхід до енергозбереження, що зводиться до заміни окремих агрегатів, не враховує взаємозв’язку енергетичних витрат, виробничого навантаження та ризику зупинення критичних процесів. Тому доцільним є перехід до процесно орієнтованого енергетичного менеджменту, який поєднує облік споживання, визначення критичних навантажень, економічне оцінювання заходів та контроль досягнутих результатів. Нормативне підґрунтя цього підходу формують положення Закону України «Про енергетичну ефективність» [2] та принципи систематичного поліпшення енергетичних показників, передбачені ISO 50001:2018 [3].

Пропонується формувати енергетичний профіль об’єкта за трьома складовими: технологічною (споживання за операціями та видами обладнання), економічною (витрати на електроенергію, технічне обслуговування й простої) і безпековою (навантаження, від яких залежить недопущення аварійних та екологічно небезпечних ситуацій). Базовим показником для сортувальних і переробних потужностей може бути питоме споживання електроенергії $e = W/M$, де W — витрати електроенергії за період, кВт·год; M — маса оброблених відходів, т. Порівняння таких показників є коректним лише для об’єктів зі співставними технологіями та з урахуванням складу відходів, завантаження потужностей і режиму роботи.

Організаційно-економічні механізми зниження енергозалежності доцільно об’єднати у три взаємопов’язані групи. Перша — управлінські заходи з невеликими початковими витратами: пооперaційний енергооблік, усунення холостих режимів, перегляд графіків роботи обладнання, планово-попереджувальне обслуговування. Друга — модернізація технологічних процесів: упровадження частотного регулювання електроприводів, енергоефективних насосів і вентиляції, автоматизованого керування навантаженням. Третя — підвищення автономності критичних операцій через резервне електроживлення, накопичувачі енергії або локальну генерацію за умови підтвердженої техніко-економічної доцільності.

Для обґрунтування інвестиційного вибору запропоновано двоетапне правило пріоритизації. На першому етапі визначають мінімально необхідний рівень безперервності критичних процесів; для систем із накопиченням електроенергії розрахункову тривалість автономної роботи можна оцінювати як $Та = Ер/Рк$, де $Ер$ — корисний запас резервної електроенергії, кВт·год; $Рк$ — середня потужність критичного навантаження, кВт. На другому етапі проєкти, що забезпечують прийнятний рівень безперервності, порівнюють за сукупними дисконтованими витратами життєвого циклу, очікуваною економією електроенергії та уникненими втратами від простоїв. Це запобігає вибору формально найдешевших рішень, які не гарантують функціонування важливих технологічних вузлів.

Фінансування таких заходів доцільно будувати як поетапний інвестиційний портфель: швидкоокупні організаційні рішення створюють ресурс для подальшої модернізації, тоді як дорогі системи автономного живлення потребують окремого обґрунтування з урахуванням сценаріїв переривання постачання. Джерелами фінансування можуть бути кошти операторів, місцеві програми, кредитні та договірні інструменти за умови їх застосовності до конкретного об'єкта. Результативність оцінюють одночасно за питомим енергоспоживанням, повною вартістю виконання технологічних операцій та тривалістю забезпечення критичних функцій.

Отже, зниження енергозалежності інфраструктури управління відходами досягається не ізольованим упровадженням енергоощадного обладнання, а узгодженням технологічних, фінансових та безпекових рішень. Запропонований підхід поєднує процесний енергооблік і двоетапний відбір проєктів: спочатку забезпечення безперервності критичних операцій, потім мінімізацію довгострокових витрат. Його практичне застосування потребує перевірки на даних конкретних підприємств та об'єктів територіальних громад.

Список використаних джерел

1. Про управління відходами : Закон України від 20.06.2022 № 2320-IX. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2320-20 (дата звернення: 05.11.2026).
2. Про енергетичну ефективність : Закон України від 21.10.2021 № 1818-IX. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1818-20 (дата звернення: 05.11.2026).
3. ISO 50001:2018. Energy management systems — Requirements with guidance for use. Geneva : ISO, 2018. URL: https://www.iso.org/standard/69426.html (дата звернення: 05.11.2026).

УДК 621.317.785:621.311.243

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИЙ ВИМІРЮВАЛЬНИЙ КАНАЛ ОБЛІКУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА ВИХОДІ МЕРЕЖЕВОГО ФОТОЕЛЕКТРИЧНОГО ІНВЕРТОРА З ОЦІНЮВАННЯМ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

Ващишак І. Р., к.т.н., доцент; Мацюк І. В., аспірант; Соколов Є. О., аспірант

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна.

Облік електроенергії на виході мережевих фотоелектричних (ФЕ) інверторів відбувається в умовах, на які лічильники не розраховані: пульсації ШІМ, гармоніки та інтергармоніки [1], дрейф частоти, зміна потужності на 70–80 % за десятки мілісекунд під час проходження хмари, імпульсні перехідні процеси та нагрівання давачів. Оцінювання спектра на фіксованому вікні з 10 періодів [2] за таких умов усереднює швидкі зміни потужності, а результат обліку не супроводжується невизначеністю, без якої неможливі валідація даних і виявлення несправностей вимірювального каналу.

Запропоновано трирівневий інтелектуальний вимірювальний канал (рис. 1). Перший рівень – адаптивний гармонічний фільтр Калмана [3], який отримує миттєву частоту від системи ФАПЧ інвертора та за статистикою інновацій перемикається між адаптацією дисперсії шуму [4] і швидким відстеженням

стрибка потужності; його доповнює вейвлет-детектор (db4) імпульсних завад. Другий рівень – нейронна мережа 4×8×1 (49 параметрів), придатна для мікроконтролера, яка компенсує температурний дрейф давача струму за температурою інвертора, градієнтом температур та опроміненістю. Третій рівень – оцінювання невизначеності активної потужності основної гармоніки в реальному часі за коваріаційною матрицею фільтра та цифровий двійник точки обліку, який порівнює виміряну потужність із розрахованою за незалежно виміряними опроміненістю і температурою.

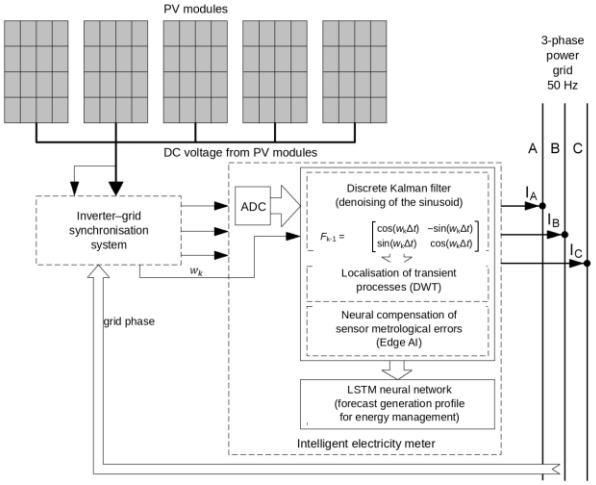


Рис. 1. Структура інтелектуального лічильника електроенергії

Канал досліджено імітаційним моделюванням однофазного інвертора потужністю 5 кВт. Середньоквадратична похибка відстеження амплітуди струму основної гармоніки становила 1,58 % номінального струму проти 8,48 % для ДПФ на 10 періодах і 4,91 % для стандартного фільтра Калмана, а час усталення після спаду потужності на 75 % – 54 мс проти 200 мс (рис. 2). Нейронний компенсатор зменшив середньоквадратичну похибку від температурного дрейфу в 5,5 раза (з 1,03 до 0,19 %). Бюджет невизначеності, складений згідно з GUM [5] для перетворювачів струму класу 0,2S і напруги класу 0,2, дав розширену невизначеність облікованої енергії ±0,52 % (k = 1,98; ν_{eff} = 136); найбільшою складовою залишається залишковий температурний дрейф. Цифровий двійник виявив зміну коефіцієнта передачі давача струму на −4 % за 4 хв без хибних спрацювань.

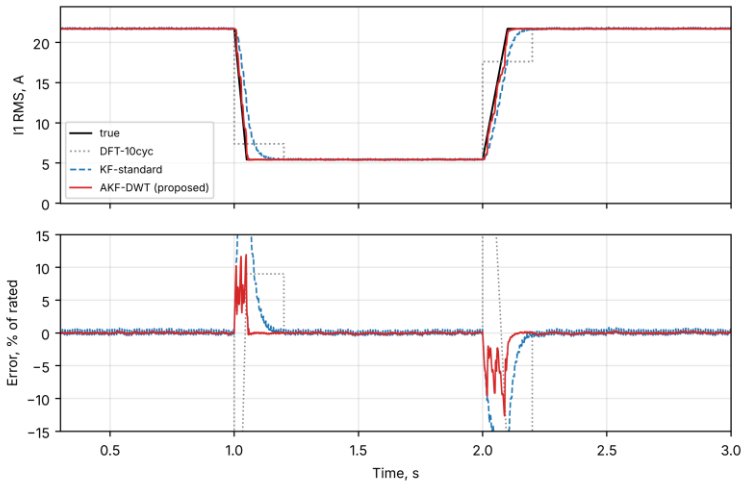


Рис. 2. Відстеження амплітуди струму основної гармоніки та похибка

Отже, рівні каналу усувають різні складові похибки і доповнюють один одного. Для енергії, інтегрованої на фіксованих вікнах 200 мс, традиційне ДПФ залишається точнішим, тому перевага запропонованого каналу полягає у вимірюванні з високою роздільною здатністю в часі, поданні результату разом із невизначеністю та перевірці достовірності вимірювань. Результати отримано на синтетичних сигналах; наступний етап – експериментальна перевірка на мережевій ФЕ установці потужністю 1,5 кВт.

Перелік джерел посилань

1. Langella R., Testa A., Meyer J., Möller F., Stiegler R., Djokic S. Z. Experimental-based evaluation of PV inverter harmonic and interharmonic distortion due to different operating conditions. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2016. Vol. 65, No. 10. P. 2221–2233.
2. IEC 61000-4-30:2015. Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-30: Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods.
3. Girgis A. A., Chang W. B., Makram E. B. A digital recursive measurement scheme for on-line tracking of power system harmonics. IEEE Transactions on Power Delivery. 1991. Vol. 6, No. 3. P. 1153–1160.
4. Mehra R. K. On the identification of variances and adaptive Kalman filtering. IEEE Transactions on Automatic Control. 1970. Vol. 15, No. 2. P. 175–184.
5. JCGM 100:2008. Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement.

УДК 621.313.322

ДОСЛІДЖЕННЯ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ЗА ПОКАЗНИКОМ НЕЗМІННОСТІ ПОТУЖНОСТІ З НЕСИМЕТРИЧНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ ТА СИМЕТРУЮЧИМ ПРИСТРОЄМ

Зубенко Є. В., здобувач другого (магістерського) рівня вищої освіти,
Бялобржеський О. В., к.т.н., доцент,
Національний університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, Україна

Впровадження систем розподіленої генерації на базі синхронних генераторів (СГ) малої потужності у локальних мікромережах дозволяє гарантувати безперебійне живлення відповідальних технологічних комплексів. Проте в умовах обмеженої встановленої потужності автономного джерела режим його експлуатації зазнає суттєвих збурень з боку нелінійних та несиметрично розподілених споживачів [3, 4]. Поява амплітудного і фазового небалансу викликає струми зворотної послідовності, які утворюють зустрічне магнітне поле подвоєної частоти (100 Гц), що зумовлює інтенсивний нагрів демпферних обмоток ротора, знакозмінні електромагнітні пульсації моменту та небезпечні вібрації валопроводу [2, 4].

Для детального дослідження цих електромагнітних явищ розроблено імітаційну модель мікромережі у середовищі MATLAB/Simulink, яка охоплює синхронний генератор номінальною повною потужністю 31,3 кВА (лінійна напруга 0,4кВ), що працює на лінійне навантаження у вигляді асинхронного двигуна потужністю 15кВт та статичне симетричне активне навантаження 3кВт.

Зв'язок із зовнішньою енергосистемою реалізовано через трансформатор 10/0,4 кВ потужністю 60 кВА (Рис.1).

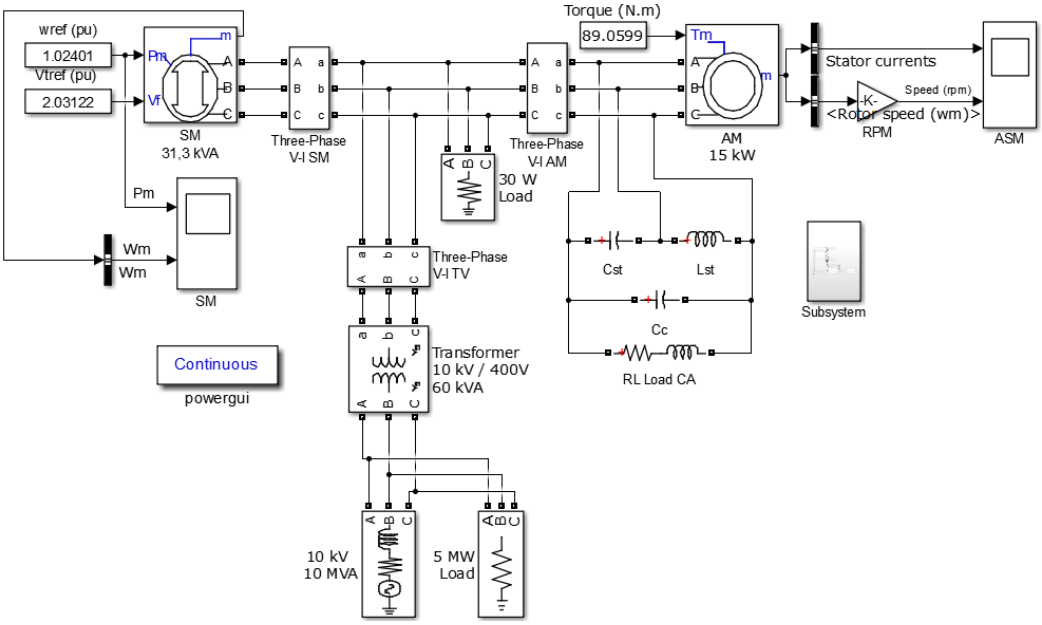


Рис. 1. Схема імітаційної моделі мікромережі.

Аналіз перехідних електромагнітних процесів показав чіткий взаємозв'язок між характером навантаження та динамічною стійкістю елементів мікромережі. При виникненні міжфазної несиметрії в статорі синхронного генератора з'являється виражений струмовий небаланс, що зумовлює знакозмінні пульсації електромагнітного моменту на подвоєній частоті мережі, збурення кутової швидкості ротора та коливання генерованої потужності. Асинхронний двигун реагує на перекіс напруг струмовим перевантаженням, суттєвим динамічним просіданням частоти обертання та деградацією енергетичних показників, що супроводжується спадом коефіцієнта незмінності потужності [1]. Мережевий трансформатор у цих умовах бере участь у перерозподілі потоків потужності, компенсуючи виниклий локальний дефіцит. Комутація схеми симетрування Штейнметца супроводжується короткочасним сплеском режимних параметрів, проте забезпечує успішне згладжування пульсацій моменту, вирівнювання фазних струмів генератора, відновлення обертів двигуна та повернення коефіцієнта незмінності до одиниці. Водночас раптове скидання навантаження за умови залишення ввімкненого пристрою симетрування спричиняє вторинний перехідний процес: реактивні ємнісно-індуктивні елементи схеми вносять штучний фазовий дисбаланс, який знову провокує пульсації моменту генератора, викликає критичне просідання коефіцієнта незмінності потужності двигуна до значень 0,77-0,82 в.о. та зумовлює зворотний реверс перетоку потужності через трансформатор у зовнішню енергосистему. Лише повне відключення симетруючого пристрою дозволяє системі плавно повернутися до стаціонарного симетричного стану. В цілому за час імітації зазначених режимів коефіцієнт незмінності потужності синхронного генератора приймав значення нижче 0,95 в.о. лише за умови перехідного процесу комутації симетруючого пристрою. На інших інтервалах зазначений коефіцієнт на знижувався нижче 0,98 в.о., на

відміну від асинхронного двигуна та трансформатора для яких зазначений показник приймав значення на рівня 0,8 в.о.

Отримані результати підтверджують нездатність пасивних схем симетрування забезпечувати якість електроенергії та надійність синхронного генератора за змінного графіка споживання, оскільки будь-які комутаційні зміни навантаження без переналаштування фільтра призводять до повторного розбалансування режимних параметрів мікромережі.

Перелік джерел посилань

1. Bialobrzheskyi O., Postil A., Yakimets S. Accounting for a positive, negative and zero sequences power in a three-phase unbalanced electrical system. Науковий вісник Національного гірничого університету. 2023. № 6. С. 93–99.
2. Akagi H., Watanabe E. H., Aredes M. Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning. 2nd ed. Piscataway, NJ: IEEE Press / Wiley, 2017. 448 p.
3. Machowski J., Bialek J. W., Bumby J. R., Kaberere N. Power System Dynamics: Stability and Control. 3rd ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2020. 840 p.
4. Костинський С. С. Аналіз несиметричних режимів роботи синхронних генераторів малої потужності. Енергетика: економіка, технології, екологія. 2020. № 2. С. 35–44.

УДК 621.311.001.57

КЛАСИФІКАЦІЯ ПРОФІЛІВ ДОБОВОГО СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ДЛЯ ФОРМУВАННЯ ТЕСТОВОЇ ПРОГРАМНОЇ МОДЕЛІ MICROGRID

Велігорський Б. О., аспірант; Бодунов В. М., к. т. н., доцент

Національний університет «Чернігівська політехніка», м. Чернігів, Україна.

Одним з трендів у галузі електроенергетики останніх років є включення альтернативних джерел генерації, які розміщуються близько до споживачів і дають змогу забезпечити більш надійне електропостачання об’єкта. Розподілена генерація, яка забезпечується, зокрема, відновлювальними джерелами електроенергії (сонце, вітер тощо), лежить в основі концепції Microgrid. На відміну від централізованих мереж, мікромережі можуть працювати або приєднаними до більшої мережі (мережевий режим роботи), або окремо (ізольований режим роботи), що дає змогу приймачам отримувати стабільну електроенергію навіть тоді, коли у головній мережі стається аварія чи інша надзвичайна ситуація.

Однак, відновлювальні джерела електроенергії є нестабільними, що зумовлено мінливістю погодних умов. З метою зменшення економічних витрат та більш раціонального керування доцільно вирішувати задачу вибору потрібного режиму роботи таким чином, щоб потреби споживачів були задоволені увесь час. Ефективніше вирішувати цю задачу дає змогу прогнозне керування, для чого необхідне врахування особливостей споживання об’єкта.

Одним з базових об’єктів, до яких можна застосувати концепцію Microgrid, є приватне домогосподарство. Цілком природньо, що більше споживання електроенергії буде в той час, коли мешканці домогосподарства перебувають удома, тому що саме тоді число одночасно задіяних приймачів більше. Тому, за

стандартного восьмигодинного робочого дня пікові значення припадатимуть на ранковий і вечірній час [1]. Ураховуючи те, що саме у вечірній час вирішується більшість домашніх справ (приготування їжі на наступні дні, прання речей тощо), то вечірній пік буде вищим за ранковий. Проте, у вихідні дні, коли мешканці суттєво більше часу проводять у себе вдома, таких виражених піків не буде, а натомість профіль споживання характеризуватиметься збільшеним споживанням у денний час [1].

Ще одним можливим варіантом застосування Microgrid є підприємство. Тут профіль споживання буде дещо відрізнятися: у денний час, коли більше працівників виконують свої робочі обов'язки, споживання електроенергії буде найбільшим, тоді як у ранковий, вечірній та нічний – мінімальним [2]. Проте, як показано у [3] на прикладі вугільних шахт, ця залежність не завжди виконується, тому що кількість змін також впливає на графік залежності. У вихідні дні, як правило, споживання електроенергії буде мінімальним, тому що працівники перебувають удома. До того ж, існують спеціалізовані підприємства з нестандартною тривалістю робочого процесу, яка не є кратною одній добі. У такому разі найбільші значення споживання будуть фіксуватися упродовж встановленої тривалості робочого процесу, яка не залежить ні від дня тижня, ні від пори року.

Не менш важливим фактором, який впливає на фактичний попит споживачів на електроенергію, є сезонність. У холодну пору зростає споживання за рахунок більшої потреби в обігріві осель та місць роботи [1]. Однак, сезонність може й по-іншому впливати на графік залежності добового споживання. Існує чимало підприємств, які працюють здебільшого у конкретну пору/пори року. Це особливо актуально для сільськогосподарських підприємств, де у весняний, літній та осінній час виконуються роботи, пов'язані з посадкою, доглядом та збором врожаю відповідно, тоді як в зимовий час вони не будуть працювати.

Ураховуючи вищенаведене, класифікувати залежності добового споживання електроенергії можна наступним чином:

1) за днем тижня: для буднього та для вихідного дня;

2) за сезонністю: для літньої, зимової, весняної, осінньої пори, а також змішані (для весняно-літньо-осінньої, осінньо-зимової тощо);

3) за типом об'єкта: для приватного домогосподарства та для підприємства/установи;

4) за кількістю робочих змін та тривалістю робіт (для підприємств та установ): двозмінні, тризмінні, з нетиповою тривалістю робочого циклу.

Наведена класифікація дасть змогу окреслити можливі випадки (межі) застосування концепції мікромереж й оцінити, для яких об'єктів і за яких умов відновлювальна генерація є більш доцільною. Так, наприклад, для сільськогосподарських підприємств можливим є досягнення більшої енергетичної незалежності завдяки тому, що основний попит припадає на ту пору, коли сонячна генерація є найвищою.

Крім того, отримані на основі сформованої класифікації графіки залежностей добового споживання електроенергії дадуть змогу визначити умовну оцінку балансу потужності в кожну годину доби в розрахунковому

режимі. Також застосування профілів дозволить перевіряти ефективність розроблюваного алгоритму керування режимами роботи Microgrid на етапі проектування відповідної програмної моделі за різних поведінкових сценаріїв споживачів і досліджувати взаємозв'язок між типом об'єкта й ефективністю алгоритму керування. Наступні публікації планується присвятити темі адаптації алгоритмів керування Microgrid під розглянуті профілі.

Перелік джерел посилань

1. Lekhel C (2025). Generic residential load profile generator based on weather data and occupancy. Mathematics and Computers in Simulation, 237, 373-389.
2. Системи електроспоживання та електропостачання промислових підприємств. Підручник. / В. Є. Шестеренко. – Вінниця: Нова Книга, 2004. – 656 с.
3. Рухлов А.В. Регулювання електроспоживання підприємств для зниження пікових навантажень в енергосистемі / А.В. Рухлов, І.М. Луценко, Н.Ю. Рухлова, Є.В. Кошеленко, О.А. Замкова // Збірник наукових праць Національного гірничого університету. – 2020. – № 74 (2023) – С. 204-212.

УДК 631.24.243

ДОСЛІДЖЕННЯ СПОСОБІВ ЗНИЖЕННЯ ВТРАТ В СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРАХ НАРУГОЮ 10/0,4 кВ

Наливайко В. А., к.т.н., доцент; Козаченко Д.Ю., магістр
Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

Силові маслонаповнені трансформатори напругою 10/0,4 кВ в електричних мережах мають термін експлуатації 30-50 років завдяки простоті конструкції та високій надійності в роботі. Але ця особливість має і іншу негативну сторону.

Втрати в трансформаторах складають до 40% від усіх втрат в розподільчих мережах. Затрати на покриття втрат в трансформаторах несуть їх власники. Величина активних (ΔW_P) та реактивних (ΔW_Q) втрат визначається відповідно до затвердженої методики [1], а саме:

$$\Delta W_P = 3 \cdot \dot{I}^2 \cdot R_T \cdot k_\Phi^2 \cdot 10^{-3} \cdot T_P + P_{HX} \cdot T_H \quad \text{(кВт·год)}, \qquad (1)$$

$$\Delta W_Q = 3 \cdot \dot{I}^2 \cdot X_T \cdot k_\Phi^2 \cdot 10^{-3} \cdot T_P + Q_{HX} \cdot T_H \quad \text{(квар·год)} \qquad (2)$$

де I - середнє протягом розрахункового періоду діюче значення сили струму трансформатора, А;

k_Φ^2 - коефіцієнт форми графіка навантаження трансформатора;

R_T - активний опір трансформатора, Ом;

T_P - час роботи трансформатора під навантаженням, годин;

T_H - час знаходження трансформатора під напругою, годин;

P_{HX} - втрати неробочого ходу трансформатора, кВт;

Q_{HX} - реактивна потужність втрат неробочого ходу трансформатора, ква;

X_T - реактивний опір трансформатора, Ом.

Суттєвим недоліком цієї методики є то, що в розрахунках приймаються

середні значення втрат неробочого ходу, без врахувань особливостей конкретного трансформатора. Хоча відомо, що на ринку появились нові партії трансформаторів із значно меншими каталожними втратами.

Нами досліджувались втрати в трансформаторах різних років випусків. Визначення фактичних втрат в трансформаторах входить в перелік нормованих періодичних випробувань, які здійснюються вимірювальними елетролабораторіями.

Таблиця 1. Залежність величини постійних активних втрат трансформаторів ТМ 160/10 від терміну експлуатації

Рік випуску	До 10 років	10-20 років	21-30 років	31-40 років	більше 40 років
Каталожне значення втрат, Вт	565	565	565	950	1200
Фактичні значення втрат , Вт	600	760	940	1230	1450
Відносне збільшення втрат, %	0	26,7	44,7	105	141,7

Дослідженнями встановлено стійке зростання фактичних втрат із збільшенням терміну роботи трансформаторів. Це пояснюється як еволюцією властивостей електротехнічних сталей, так і погіршенням стану магнітопроводів в процесі експлуатації (корозія магнітопроводів, недосконаліть технології ремонту, та ін.).

Застосування фактичних даних при розрахунках втрат безумовно збільшить мотивацію власників щодо заміни старих трансформаторів на нові з покращеними електромагнітними властивостями. За нашими оцінками оновлення парку силових трансформаторів є економічно обгрунтованим. При цьому термін окупності не перевищує 8-10 років.

Перелік джерел посилань

1. Методичні рекомендації визначення технологічних втрат електроенергії в трансформаторах і лініях електропередавання. Затв. 21.06.2013, №399, Міністерство енергетики та вугільної промисловості України.

УДК 621.31: 330.131.7: 004.4

АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ СУЧАСНОГО ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ В ПЛАНУВАННІ РЕКОНСТРУКЦІЇ ОБ'ЄКТІВ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Руденко Є. О, Трунова І. М., к.т.н., доцент

[1]АТ «Харківобленерго», м. Харків, Україна.

[2]Державний біотехнологічний університет, м. Харків, Україна.

Як відомо, кожний Оператор системи розподілу планує розвиток розподільних мереж, зокрема, на основі технічного стану об'єктів системи розподілу, наприклад, при їхньому незадовільному технічному стані -

реконструкцію таких об’єктів. При цьому, важливим є визначити пріоритетність виконання таких робіт, наприклад, як зазначалося в [1], з врахуванням ймовірності відмови об’єкта та наслідків цієї відмови. Для визначення наслідків відмов об’єктів розподільних мереж мають бути прораховані збитки від недовідпущеної електроенергії споживачам, вплив на навколишнє середовище та безпеку, компенсації споживачам у разі порушення гарантованих стандартів якості електропостачання тощо. Тобто створена автоматизована система з використанням баз даних інтелектуальних систем електропостачання для реалізації алгоритму визначення пріоритетних об’єктів для реконструкції, наприклад, як пропонувалося в [2]. Крім того, існує спеціалізоване програмне забезпечення, яке можна також використовувати з цією метою. Наприклад, DIgSILENT PowerFactory [3], що має функцію оцінки надійності з визначенням стандартних показників якості електропостачання, зокрема, тих, що використовуються в Україні (SAIDI, ENS тощо), з розподіленням внеску у ці показники кожного виду об’єктів розподільних мереж (повітряних та кабельних ліній електропередачі, трансформаторів тощо).

Аналіз можливості використання програмного забезпечення DIgSILENT PowerFactory показав, що маючи дані про інтенсивність відмов, можна моделювати ймовірності подій. Також можна виконати розрахунок вартості перерв електропостачання, що залежить від їхньої тривалості, в цілому та індивідуальних витрат на кожне навантаження.

Перелік джерел посилань

1. Trunova, I., Miroshnyk, O., Moroz, O., Savchenko, O., Pazyi, V., Sereda, A., Halko, S., Buinyi, R. The Substantiation of Reconstruction of Power Distribution Networks Objects// 2021 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), 13-17 Sept. 2021, Kharkiv, Ukraine, Ukraine,Publisher: IEEE - Page(s):126-131.

2. Трунова І. М. Автоматизована система обґрунтування реконструкції об’єктів розподільних мереж / І. М. Трунова, О. О. Мірошник, А. І. Середа, С. М. Дудніков, В. Г. Пазій, О. М. Мороз, О. А. Савченко, С. А. Попадченко, С. В. Галько, І. В. Ладижинський // Науковий Вісник ТДАТУ. - 2024. – Вип. 24, том 2. – С.96-108.

3. Official website of DIgSILENT GmbH [Electronic resource]. URL: https://www.digsilent.de/en/powerfactory.html (accessed October 16, 2026)

УДК 829.429. 3:621.313

ВИКОРИСТАННЯ НЕЙРОРЕГУЛЯТОРА В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ СЕПАРАТОРІВ МОЛОКА

Задорожна В.М., аспірантка, Лисиченко М.Л, д.т.н., професор,
Державний біотехнологічний університет

Енергоефективність обладнання, що використовується у виробництві та переробці молочної продукції, є одним із визначальних чинників економічної ефективності виробництва. Одним із напрямів розв’язання цього завдання є вдос3коналення систем керування електроприводами сепараторів молока, від стабільності роботи яких залежить забезпечення необхідного швидкісного режиму за різних умов технологічного навантаження, тому, застосування

нейрорегулятора в системі керування його електропривода є перспективним напрямком підвищення ефективності їхньої роботи [0,2].

Метою роботи є обґрунтування доцільності використання нейрорегулятора в системі керування електроприводом сепаратора молока для зменшення питомого енергоспоживання, оптимізації динамічних режимів роботи та зниження експлуатаційних витрат.

Алгоритм його роботи передбачає збір та аналіз інформації про поточний стан електропривода та формування відповідного керуючого впливу. Для цього можуть використовуватися значення заданої або фактичної частоти обертання ротора, похибка регулювання, струм електродвигуна та оцінка поточного навантаження. Сформований сигнал керування надходить до перетворювача частоти, який забезпечує регулювання швидкості обертання електродвигуна відповідно до встановленого режиму роботи.

Можливості застосування нейромережевих алгоритмів у системах керування асинхронними електроприводами висвітлено в низці наукових досліджень [3]. Зокрема, використання таких алгоритмів розглядається, як один із шляхів удосконалення динамічних характеристик електропривода та підвищення його стійкості до зміни навантаження. Окрему увагу приділяють інтелектуальним методам керування потокозчепленням і електромагнітним моментам, застосування яких може сприяти зменшенню втрат електроенергії [0]. Однак, перенесення зазначених підходів на електроприводи сепараторів молока потребує додаткового обґрунтування з урахуванням особливостей конструкції обладнання та технологічних параметрів процесу сепарування.

Оцінювання ефективності нейро мережевого керування доцільно здійснювати шляхом порівняння його характеристик із показниками системи, оснащеної традиційним регулятором. Дослідження необхідно проводити за однаковими початковими умовами, зіставного навантаження та однакової продуктивності обладнання. Основними критеріями оцінювання мають бути тривалість перехідного процесу, величина перерегулювання, точність підтримання заданої частоти обертання, динаміка струму електродвигуна, зміна електромагнітного моменту та споживання електроенергії. Отримані результати дадуть змогу встановити особливості функціонування системи з нейрорегулятором і визначити, наскільки його застосування є доцільним для підвищення енергетичної ефективності електропривода сепаратора молока.

Оцінювання економічної доцільності застосування нейрорегулятора в електроприводі сепаратора молока передбачає комплексний аналіз витрат, пов’язаних із його впровадженням та подальшою експлуатацією. Окрім потенційного зменшення споживання електроенергії, необхідно враховувати вартість додаткового обладнання, розроблення й налаштування алгоритму керування, інтеграції його в наявну систему автоматизації та технічного обслуговування. Річний економічний ефект визначають з урахуванням скорочення експлуатаційних витрат і додаткових витрат, що виникають у процесі використання модернізованої системи.

На підставі отриманих розрахунків можна зробити висновок, що виикористання нейрорегулятора в системі керування електроприводом сепаратора молока є

перспективним напрямом підвищення енергоефективності молокопереробного обладнання. Поєднання нейромережевого алгоритму з перетворювачем частоти створює передумови для адаптивного регулювання швидкості обертання, поліпшення динамічних характеристик і потенційного зменшення непродуктивних енергетичних витрат. Водночас підтвердження його ефективності потребує проведення математичного моделювання й експериментальних досліджень, за результатами яких можна оцінити питомі витрати електроенергії, продуктивність обладнання та економічну доцільність упровадження запропонованого рішення.

Перелік джерел посилань

1. Eneh J. N., Ene P. C. Optimizing the control and automation of variable torque on 3-phase induction motor using programmable neuro logic controller and variable frequency drive. *Nigerian Journal of Technology*. 2020. Vol. 39, no. 3. P. 887–895. DOI: https://doi.org/10.4314/njt.v39i3.30.
2. Mencou S., Ben Yakhlef M., Tazi E. B. Advanced control of induction motors (2019–2025): A comprehensive review of strategies, algorithms and sensorless techniques. *e-Prime – Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*. 2025. Vol. 14. Article 101098. DOI: https://doi.org/10.1016/j.prime.2025.101098.
3.Sivaraju S. S., Senthilkumar T., Sankar R., Anuradha T., Usha S., Musirin I. B. Improving the efficiency of induction motor drive by flux and torque control: A hybrid LSE-RERNN approach. *ISA Transactions*. 2024. Vol. 147. P. 215–226. DOI: https://doi.org/10.1016/j.isatra.2024.01.034.

УДК 621.311.1:316.7

ДОСВІД ЗАСТОСУВАННЯ ДЖЕРЕЛА БЕЗПЕРЕБІЙНОГО ЖИВЛЕННЯ SMART UPS LP-1000 PRO ДЛЯ ЖИВЛЕННЯ ЧПК HELL GRAUTE SESTEM K5

Лисиченко Р. М., к.т.н.
ТОВ «Компанія кольорової поліграфії Україна-Юнь Чень»

Проблема підтримання відповідних параметрів електричної енергії для живлення дорого вартісного високоточного технологічного обладнання в умовах постійного обстрілу виробничої інфраструктури стає особливо гострою, внаслідок того, що здебільшого знеструмлюються цілі райони і підприємства є актуальною [1]. Тому, доцільно утворювати «локальні» електричні мережі із живленням від незалежних джерел енергії, що дозволить насамперед підвищити рівень стійкості всієї енергосистеми підприємства.

Як показує набутий досвід , в умовах реального виробництва ефективно застосовувати джерела безперебійного живлення (ДБЖ) для забезпечення електричною енергією різних типів обладнання, чутливого до якості електроживлення, таких як: комп'ютерів, робочих станцій, серверів, систем телекомунікації та іншого обчислювального і телекомунікаційного устаткування. ДБЖ захищає це обладнання від відмов, пов'язаних з електропостачанням низької якості або з повним відключенням подачі електроенергії. Чутливе електрообладнання також потребує захисту від електричних перешкод, які можуть бути викликані зовнішніми перешкодами таких, як наприклад, грозовим розрядом, аварією на лінії живлення від підствнції енергопостачання або

електромагнітним випромінюванням різного роду «глушилок» для боротьби з дронами або місцевими перешкодами такими, як запуском потужних електродвигунів, електрозварюванними апаратами.

Під порушенням електроживлення розуміють відсутність напруги, неприпустимо низька або неприпустимо висока напруга, коливання напруги, коливання частоти, диференційний або синфазний шум, викиди напруги і т.п. ДБЖ усуває перешкоди, що виникають в електромережі, підтримує постійну напругу і при необхідності подає автономне живлення на підключене устаткування. Вказані функції дозволяють ізолювати від неполадок в електромережі чутливі системи, в яких можливе пошкодження програмного забезпечення, збору та обробки великого масиву статистичних даних, або взагалі порушення нормальної роботи обладнання.

Вказаний ДБЖ відноситься до класу «онлайн» - пристроїв з подвійним перетворенням, які здійснюють фільтрацію мережевої напруги і постачання критичних систем безперервним однофазним живленням високої якості. Одночасно з подачею на підключене устаткування напруги високої якості ДБЖ підтримує акумулятори в зарядженому стані. При відмові мережевого електропостачання ДБЖ продовжує подачу напруги на підключене устаткування без будь-яких перерв. Якщо тривалість відмови мережевого електропостачання перевищує час забезпечення резервного живлення, ДБЖ завершує роботу, щоб уникнути глибокого розряду акумуляторів. При
відновленні напруги ДБЖ автоматично запускається і відновлює подачу напруги на підключене устаткування і заряджає акумулятори.

Реальні переваги комплекту обладнання типу SMART UPS LP-10000 PRO [2]:
- викиди (перешкоди) мережевої напруги згладжуються вхідним фільтром;

- випрямляч, випрямляє змінну напругу, що подається на основний перетворювач і зарядний пристрій, який підтримує акумулятори в повністю зарядженому стані;

- основний перетворювач (інвертор) перетворює постійну напругу в змінну напругу, яка подається на підключене устаткування;

- акумулятори забезпечують живлення підключеного обладнання в разі порушення подачі напруги;

- перетворювач постійного струму заряджає акумулятори до рівня, необхідного для роботи основного перетворювача.

Досвід майже двохрічної експлуатації цього обладнання дозволяє зробити висновок про його високу надійність та ефективність, зокрема не зафіксовано жодного порушення технологічних процесів при проведені кольорової поліграфії і можливого пошкодження дороговартісних матеріалів замовника.

Перелік джерел посилань

1. Гриб О.Г., Сокол Е. И., Жаркин А. Ф., Васильчено В. И., Тесик Ю. Ф. / Под ред. О. Г. Гриба. Качество электрической энергии. Том 2. Контроль качества электрической энергии. – Харьков: ПП «Граф-Ікс», 2014. – 244 с.
2. Посібник користувача. Джерело безперебійного живлення. Багатофункціональний. ИПБ Smart-UPS LogicPrower-1000 PRO. / logicpower.ua. – 21.

УДК 621.372.826:637.43

КОНСТРУКТИВНА СХЕМА АВТОМАТИЗОВАНОЇ РОЛИКОВОЇ КОНВЕЄРНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ ЛАЗЕРНОЇ ОБРОБКИ ІНКУБАЦІЙНИХ ЯЄЦЬ

Міленін Д.М., к.т.н., доцент, Лисиченко М. Л., д.т.н., професор
Державний біотехнологічний університет, м. Харків, Україна

Останніми роками все активніше застосовується низькоенергетичне лазерне випромінювання для активізації окремих біохімічних процесів в біологічних об'єктах, що дозволяє значно економити енергію живим організмам на реакцію відповіді. Причому, лазерні технології дозволяють діяти обмежено – активізувати або пригнічувати тільки визначені процеси, а не весь організм вцілому [1].

Відомі автоматизовані установки для передінкубаційної обробки яєць які потребують узгодження транспортування яйця з режимом лазерної обробки їх поверхні [2,3].

Метою роботи є розробка конструкції роликової конвеєрної установки з можливістю здійснювати роздільне керуванням поступальним рухом яєць та обертанням роликів, що дозволить змінювати тривалість перебування яєць у камері та умови їх переміщення відносно джерела лазерного випромінювання.

Запропонована установка містить вузол завантаження, роликовий конвеєр, камеру опромінення, два лазерні модулі і систему автомтичного керування. Окремі яйця розміщуються між сусідніми профільованими роликами. Тяговий механізм переміщує ролики разом із яйцями, а окремий привод через контактний ремінь діє на кінцеві приводні елементи роликів і забезпечує їх обертання. Схему взаємодії основних вузлів наведено на рис. 1.

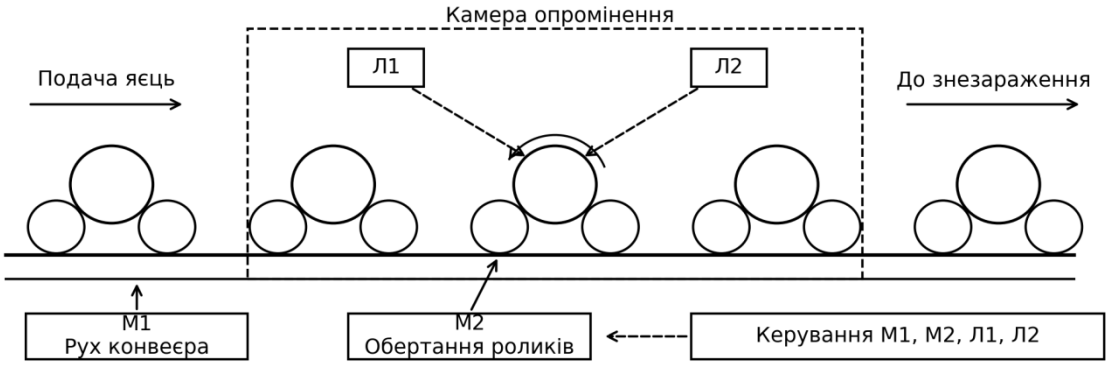


Рис.1. Схема установки: М1, М2 - приводи; Л1, Л2 - лазерні модулі.

Лазерні модулі встановлюють у камері під різними кутами до поверхні яєць, а завдяки особливої конструкції кріплень можливо регулювати висоту встановлення та кут нахилу модулів, з метою формування ефективної робочої ділянки опромінення. Контролер отримує сигнали від датчика наявності яєць і датчиків руху тягового механізму та привода роликів.

За сталої довжини робочої зони та зменшення швидкості конвеєра збільшує час перебування яйця під лазерними модулями. Швидкість контактного ременя задають з урахуванням поступального руху роликів, оскільки частота обертання роликів залежить від їхніх розмірів і відносної швидкості ременя та осей роликів. Вибір режиму залежить від виду птиці, розмірів яєць, параметрів лазерного випромінювання та допустимого нагрівання шкаралупи. Під час налагодження зіставляють частоту обертання роликів із фактичним обертанням яєць, оскільки проковзування в місцях контакту може змінювати режим обробки.

Для налаштування установки на різні розміри яєць передбачено змінні профільовані ролики та регульовані напрямні подавального вузла. Яйця орієнтують великою віссю вздовж осей роликів, що створює умови для їх обертання навколо цієї осі. Відстань між яйцями вибирають з урахуванням їхніх розмірів та взаємного затінення. Контактні поверхні роликів мають забезпечувати зчеплення зі шкаралупою без її пошкодження та бути доступними для очищення.

Оператор задає режим для партії яєць відповідної породи птиці. Після перевірки закриття камери та підтвердження руху приводів система дозволяє роботу лазерних модулів. За зміни швидкості конвеєра контролер узгоджує завдання привода роликів із новим режимом транспортування. Завершення обробки відбувається після припинення подавання та виходу останнього яйця з камери. Після аварійної зупинки повторний запуск здійснює оператор, а яйця з незавершеним циклом відокремлюють для визначення подальшого порядку обробки.

Отже, розроблено конструктивну схему, що розвиває попередні патентні рішення шляхом роздільного керування транспортуванням і обертанням яєць та застосування блокувань увімкнення випромінювачів. Наступний етап передбачає виготовлення макета та оцінювання розподілу дози опромінення, стану шкаралупи й результатів подальшого знезараження. Ефективність запропонованої установки експериментально ще не визначено.

Перелік джерел посилань

1. Лазер і здоров’я: монографія. Кіпенський А. В., Васильєва-Лінецька Л. Я, Вуйцік Вальдемар та ін. заг. ред. А. В. Кіпенського. – Харків: Комунальне підприємство «Міська друкарня», 2024. 387 с.
2. Спосіб обробки інкубаційних яєць : пат. 72084 Україна : МПК A01K 45/00 / Міленін Д. М., Лисиченко М. Л., Терещенко О. В., Артеменко О. Б. № u201115208 ; заявл. 22.12.2011; опубл. 10.08.2012, Бюл. № 15.
3. Спосіб обробки інкубаційних яєць : пат. 128699 Україна : МПК A01K 45/00, A61D 19/00, A01K 41/00 / Міленін Д. М., Лисиченко М. Л. № u201800315 ; заявл. 11.01.2018 ; опубл. 10.10.2018, Бюл. № 19.

УДК 621.316.13

СИСТЕМА ЕНЕРГОІНФОРМАЦІЙНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ СПОЖИВАЧІВ КРИТИЧНОЇ ГРУПИ

Коломієць Н. П., здобувач вищої освіти; Каплун В. В., д.т.н., професор
Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

Атаки на енергетичну інфраструктуру й аварійні відключення вимагають від систем електропостачання об’єктів критичної інфраструктури [1] переходу від пасивного резервування до активного керування режимами з урахуванням стану мережі та загроз [2–4]. Мета роботи – обґрунтувати структуру системи енергоінформаційного забезпечення (СЕІЗ) електропостачання споживачів критичної групи.

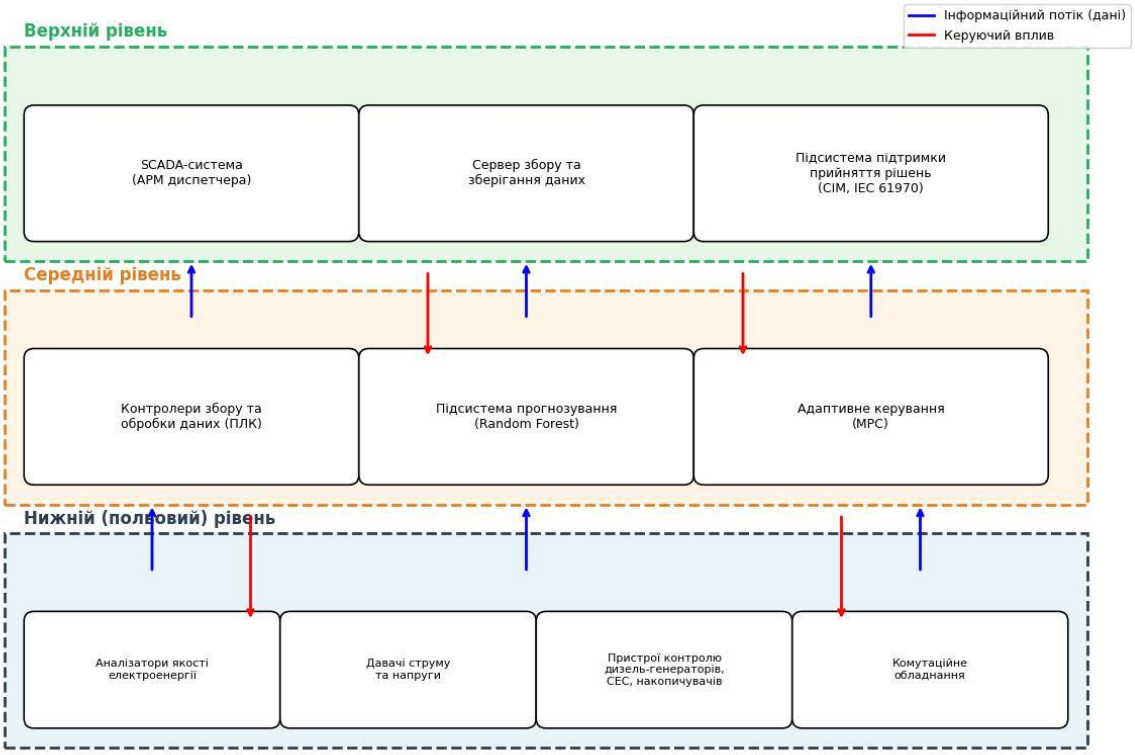


Рис. 1. Структурна схема системи енергоінформаційного забезпечення

Запропонована СЕІЗ має трирівневу архітектуру (рис. 1) на основі стандартів IEC 61850 та CIM. Нижній (польовий) рівень містить аналізатори якості електроенергії (понад 250 параметрів, EN 50160, IEC 61000-4-30), давачі струму й напруги на вводах і пристрої контролю дизель-генераторів (ДГ), систем накопичення енергії (СНЕ) та комутаційного обладнання; дискретність збору даних – не більше 10 мс. Середній рівень утворюють контролери на базі ПЛК, верхній – SCADA-система з відкритою архітектурою. Інформаційна модель за IEC 61970 (CIM) забезпечує сумісність з АСДУ операторів систем розподілу та передачі.

Рисунок 1 – Структурна схема системи енергоінформаційного забезпечення

Ключовим елементом є підсистема прогнозування навантаження ансамблевим методом Random Forest з горизонтом до 24 год, яка, на відміну від

традиційних методів, крім історичних і метеоданих, враховує інформацію про загрози (ракетні та дронові атаки на енергетичну інфраструктуру, графіки аварійних відключень). Це дає змогу завчасно перерозподіляти навантаження між критичними й некритичними споживачами та переходити на автономне живлення до фактичного зникнення напруги в мережі.

Підсистема керування на основі методів динамічного програмування перерозподіляє потужність з урахуванням заряду СНЕ, доступної потужності ДГ, прогнозу споживання та рівня загрози [5]. Застосовано прогнозуюче керування з моделлю (MPC), яке на кожному кроці обчислює оптимальну послідовність керуючих впливів на горизонті 1–4 год; декомпозиція задачі оптимізації дає змогу виконувати його в реальному часі на промислових контролерах середнього рівня.

Кібербезпеку забезпечено сегментацією мережі на ізольовані зони (вимірювальну, керуючу, інформаційну), протоколами TLS 1.3 та IPsec і системою виявлення вторгнень; у разі втрати зв’язку з верхнім рівнем система переходить у режим «ізольованого острова».

Рішення перевірено на моделі в MATLAB/Simulink (Simscape Electrical): мережа 10 кВ, ДГ 200 кВт, СЕС 50 кВт, СНЕ $LiFePO_4$ 100 кВт·год, навантаження критичної групи 150 кВт. У сценаріях нормального режиму, обмеження потужності мережі та її повного відключення система забезпечила безперервне живлення критичних споживачів в автономному режимі не менше 8 год за повного навантаження з відхиленням напруги в межах ±5 % і частоти ±0,2 Гц.

Висновок. Запропоновану СЕІЗ доцільно застосовувати під час модернізації електропостачання об’єктів критичної інфраструктури та проєктування мікромереж і локальних енергетичних комплексів. Подальші дослідження – вдосконалення прогнозування загроз та інтеграція з платформами ситуаційної обізнаності національного рівня.

Перелік джерел посилань

1. Про критичну інфраструктуру : Закон України від 16.11.2021 № 1882-IX. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1882-20 (дата звернення: 06.06.2026).

2. Сініцина Є. А., Ємельянова К. С. Забезпечення надійності електропостачання критичної інфраструктури в умовах воєнних ризиків. Комунальне господарство міст. 2025. № 2 (185). С. 45–52.

3. Енергетична стратегія України на період до 2050 року. Кабінет Міністрів України, 2023. URL: https://www.kmu.gov.ua (дата звернення: 06.06.2026).

4. Жилін А. В., Плюгін В. Є. Аналіз сучасного стану досліджень режимів роботи міських енергосистем. Information Technologies: Science, Engineering, Technology, Education, Health (MicroCAD-2025) : тези доп. XXXIII міжнар. наук.-практ. конф. Харків : НТУ «ХПІ», 2025. С. 112–114.

5. Каплун В. В., Осипенко В. В., Штепа В. М., Макаревич С. С. Управління енергоефективністю локальних систем електроживлення : монографія. Київ, 2020. ISBN 978-617-7986-02-6.

УДК 621.311:621.355

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ НАКОПИЧУВАЧА НА АКУМУЛЯТОРАХ «ДРУГОГО ЖИТТЯ» ДЛЯ ОБМЕЖЕННЯ МАКСИМУМУ ПОТУЖНОСТІ АГРОПІДПРИЄМСТВА З УРАХУВАННЯМ ДЕГРАДАЦІЇ

Лимарь В. О., здобувач вищої освіти; Павленко В. М., к.т.н., доцент;

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

Тягові Li-Ion батареї електромобілів виводяться з експлуатації за залишкової ємності 70–80 %, і їх повторне використання в стаціонарних накопичувачах (second-life BESS, SL-BESS) може знизити вартість накопичення енергії [1; 2]. Для агропідприємства з максимальним навантаженням 175 кВт обмеження потужності до 130 кВт потребує щодобового розряду близько 120 кВт·год. Проте батарея другого життя деградує швидше і потребує запасу ємності [3].

Мета роботи – порівняти приведену вартість накопичення (LCOS) для SL-BESS і нової LFP-батареї з урахуванням деградації та визначити раціональну глибину розряду.

Ємність, що забезпечує добову енергію $E_д$ і наприкінці строку служби, визначали як

$$C_0 = \frac{E_д}{\eta\, DoD} \cdot \frac{SoH_0}{SoH_к}, \qquad (1)$$

де η = 0,95 — ККД розряду; *DoD* — глибина розряду; SoH_0, $SoH_к$ — початковий і кінцевий стан здоров’я (для SL-BESS 0,8 і 0,6, для нової батареї 1,0 і 0,8). Ресурс у циклах залежно від глибини розряду описано степеневою залежністю $N(DoD) = N_0(0{,}8/DoD)^{1{,}5}$ з N_0 = 2500 (SL) і 6000 (нова), обмеживши календарний строк 8 і 15 роками відповідно. Приведену вартість накопичення визначали як

$$LCOS = \frac{K + \sum_{t=1}^{T} \frac{O_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^{T} \frac{E_д n_д}{(1+r)^t}}, \qquad (2)$$

де K — капітальні витрати (батарея плюс перетворювач 130 кВт); O_t — експлуатаційні витрати (2 % K на рік); $n_д$ = 330 циклів на рік; r = 8 %. Питому вартість прийнято 150 €/(кВт·год) для SL-BESS і 300 €/(кВт·год) для нової батареї, а для перетворювача — 100 €/(кВт·год).

Для SL-BESS існує раціональна глибина розряду близько 75–80 % (табл. 1, рис. 1): за меншої глибини зростає необхідна ємність (1), за більшої — скорочується ресурс.

Таблиця 1 – Порівняння варіантів

DoD, %	SL: C_0, кВт·год / строк, роки	SL: LCOS, €/(МВт·год)	Нова: C_0, кВт·год / строк, роки	Нова: LCOS, €/(МВт·год)
50	337 / 8,0	311	316 / 15	372
60	281 / 8,0	270	263 / 15	318

70	241 / 8,0	241	226 / 15	279
80	211 / 7,6	227	197 / 15	250
90	187 / 6,3	236	175 / 15	227

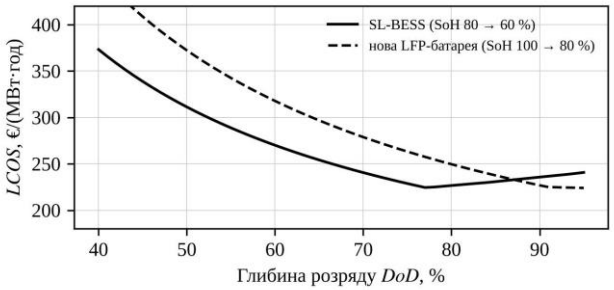


Рис.1. Залежність LCOS від глибини розряду

Мінімальні значення LCOS обох варіантів за прийнятих цін практично однакові (≈ 224 €/(МВт·год)); перевага SL-BESS зникає. SL-BESS стає вигіднішою лише за питомої вартості нижче 150 €/(кВт·год): за 125 і 100 €/(кВт·год) мінімальна LCOS становить 198 і 171 €/(МВт·год). Отже, визначальним є відношення ціни до залишкового ресурсу, яке потрібно підтверджувати вхідними випробуваннями модулів [2; 3].

Висновок. За прийнятих припущень, SL-BESS доцільна за глибини розряду 75–80 % і питомої вартості не більше половини вартості нової батареї. Подальша робота – уточнення моделі деградації за результатами тестування модулів, урахування тарифів та інтеграція з ФЕС об’єкта [4; 5].

Перелік джерел посилань

1. Gharebaghi M., Rezaei O., Li C., Wang Z., Tang Y. A Survey on Using Second-Life Batteries in Stationary Energy Storage Applications. Energies. 2025. Vol. 18, No. 1. Art. 42. DOI: https://doi.org/10.3390/en18010042.

2. Nováková K., Pražanová A., Stroe D.-I., Knap V. Second-Life of Lithium-Ion Batteries from Electric Vehicles: Concept, Aging, Testing, and Applications. Energies. 2023. Vol. 16, No. 5. Art. 2345. DOI: https://doi.org/10.3390/en16052345.

3. Edge J. S. et al. Lithium ion battery degradation: what you need to know. Physical Chemistry Chemical Physics. 2021. Vol. 23, No. 14. P. 8200–8221. DOI: https://doi.org/10.1039/D1CP00359C.

4. Павленко В., Нікітін Є. Інтеграція мікроТЕС Стірлінга в керовані PV–BESS мікромережі. Електромеханічні і енергозберігаючі системи. 2026. № 2 (73). С. 8–15. DOI: https://doi.org/10.32782/2072-2052.2026.2.73.1.

5. Горбель О. О., Павленко В. М. Проєктування автономних систем електропостачання сільськогосподарських об’єктів з використанням фотоелектрики та акумуляторів. Енергоефективний університет: матеріали XIV Міжнар. наук.-практ. конф., Київ, 23 жовт. 2025 р. Київ: КНУТД, 2025. С. 23.

УДК 621.316.925:004.7

ОЦІНЮВАННЯ ДЕТЕРМІНОВАНОСТІ ТА ВІДМОВОСТІЙКОСТІ ПРОЦЕСНОЇ ШИНИ ЦИФРОВОЇ ПІДСТАНЦІЇ 110/10 КВ ЗА УМОВ МЕРЕЖЕВИХ ЗБОЇВ

Мельник Д. Л., здобувач вищої освіти; Павленко В. М., к.т.н., доцент;
Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

Перехід підстанцій 110/10 кВ на архітектуру IEC 61850 переносить функції релейного захисту з мідних вторинних кіл у мережу Ethernet: команди відключення передаються GOOSE-повідомленнями, а миттєві значення струмів і напруг – потоками Sampled Values. Тому надійність захисту залежить і від доступності мережі [1; 2]. За попередньою оцінкою авторів, затримка GOOSE за 1–7 комутаторів становить 1,0–2,2 мс, тобто бюджет 3 мс витримується навіть з одним повтором через інтервал T_1 лише за обмеженої глибини мережі.

Мета роботи – порівняти архітектури процесної шини (зірка, кільце RSTP, PRP, HSR) за коефіцієнтом неготовності тракту зв'язку та ймовірністю недоставлення GOOSE-команди за втрат кадрів.

Неготовність окремого комутатора визначали за інтенсивністю відмов λ і середнім часом відновлення $T_в$:

$$U = \frac{\lambda T_в}{1+\lambda T_в} \approx \lambda T_в, \qquad (1)$$

для послідовного тракту з n комутаторів $U_{посл} \approx nU$, для двох незалежних мереж PRP $U_{PRP} = U_A U_B$, для кільця HSR (вихід з ладу по одному вузлу в кожній з двох гілок довжиною a і b) $U_{HSR} \approx abU^2$ [3]. Ймовірність того, що команда не буде доставлена в межах бюджету часу, за незалежних втрат кадрів з ймовірністю p дорівнює

$$P_{нд} = p^m, \qquad (2)$$

де m – кількість незалежних копій кадру, що встигають у бюджет: $m = 1$ – одна передача; $m = 2$ – повтор через T_1 або дублювання PRP/HSR; $m = 4$ – їх поєднання. Прийнято (ілюстративно): середній наробіток комутатора на відмову 200 000 год ($\lambda = 5 \cdot 10^{-6}$ год$^{-1}$), $T_в = 8$ год; ці значення є припущеннями й підлягають заміні паспортними даними обладнання.

Основний внесок у неготовність зірки та кільця RSTP (табл. 1) дає комутатор, до якого підключено IED: він є єдиною точкою відмови, і кільцеве резервування магістралі цього не усуває. Архітектури PRP і HSR зменшують неготовність на чотири порядки та забезпечують нульовий час перемикання, що принципово для функцій 87T, 87B і 50BF. У кільці RSTP додатково виникає перерва зв'язку на час реконфігурації, тривалість якої залежить від налаштувань і кількості вузлів.

Таблиця 1 – Неготовність тракту зв'язку між двома IED (розрахунок за припущеннями)

Архітектура	U	Простій, хв/рік	Перерва при одиничній відмові

Зірка, 2 комутатори на шляху	$8{,}0\cdot10^{-5}$	42	до ремонту (≈ 8 год)
Кільце RSTP (IED через 1 комут.)	$4{,}0\cdot10^{-5}$	21	час реконфігурації RSTP
PRP, дві незалежні зірки	$6{,}4\cdot10^{-9}$	0,003	відсутня
HSR, кільце з 6 вузлів	$6{,}4\cdot10^{-9}$	0,003	відсутня

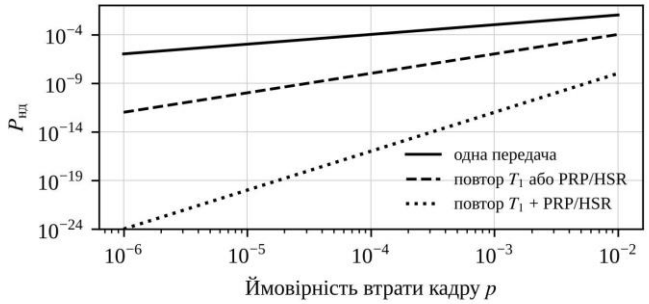


Рис. 1. Ймовірність недоставлення GOOSE-команди в межах бюджету часу

Для втрат кадрів (рис. 1) за $p = 10^{-3}$ одна передача дає $P_{нд} = 10^{-3}$, дублювання – 10^{-6}, поєднання повтору й дублювання – 10^{-12}. Формули (1) і (2) припускають незалежність відмов і втрат; на практиці можливі відмови спільної причини (спільне живлення, «шторм» кадрів, помилки SCD), тому отримані значення є нижньою межею ризику, а не гарантованим показником.

Висновок. За прийнятих припущень вибір архітектури процесної шини визначає надійність захисту сильніше, ніж швидкість каналу: PRP або HSR зменшують неготовність тракту зв'язку з $\approx 10^{-5}$ до $\approx 10^{-9}$ і квадратично знижують ймовірність недоставлення команди. Подальша робота передбачає моделювання мережі з навантаженням SV і пріоритетами IEEE 802.1Q, урахування відмов спільної причини та випробування на стенді [4; 5].

Перелік джерел посилань

1. IEC 62439-3:2021. Industrial communication networks – High availability automation networks – Part 3: Parallel Redundancy Protocol (PRP) and High-availability Seamless Redundancy (HSR). Geneva: IEC, 2021.

2. Kniphoff da Cruz A., Hackenhaar Kellermann A. C., da Silva I. C., Fernandes de Oliveira J. M., Kniphoff da Cruz M. E. J., Däubler L. IEC 61850 GOOSE: A Systematic Literature Review on the State of the Art and Current Applications. Automation. 2026. Vol. 7, No. 2. Art. 62. DOI: https://doi.org/10.3390/automation7020062.

3. Billinton R., Allan R. N. Reliability Evaluation of Power Systems. 2nd ed. New York: Plenum Press, 1996. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4899-1860-4.

4. Семенов А. О., Павленко В. М., Скрипник В. О. Інтелектуалізація вакуумних вимикачів у мережах середньої та високої напруги. Енергетика і автоматика. 2026. № 2. С. 138–146. DOI: https://doi.org/10.31548/energiya2(84).2026.138.

5. Павленко В. М., Воляник О. Ю., Пономаренко І. В., Данильченко Д. О. Дослідження перспектив розвитку технології «розумних енергосистем» із застосуванням розподілених баз даних. Енергетика і автоматика. 2024. № 5 (75). С. 66–76. DOI: https://doi.org/10.31548/energiya5(75).2024.066.

УДК 621.314.21:004.89

ПРОГНОЗУВАННЯ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА 110 КВ ЗА ДИНАМІКОЮ ІНДЕКСУ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ТА ГАЗІВ, РОЗЧИНЕНИХ В ОЛИВІ

Мельник Л. В., здобувач вищої освіти; Павленко В. М., к.т.н., доцент;
Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

Індекс технічного стану (Health Index, HI) узагальнює результати хроматографічного аналізу розчинених газів (DGA), вологовмісту й пробивної напруги оливи, ступеня полімеризації паперу та температурних режимів в одне число від 0 до 1 [1; 2]. Безперервний IIoT-моніторинг дає ряд значень HI, однак для планування ремонтів експлуатаційному персоналу потрібен не поточний індекс, а оцінка часу до досягнення граничного стану – залишкового ресурсу (Remaining Useful Life, RUL) – разом з її невизначеністю. Інтерпретація газів, що зумовлюють зміну індексу, регламентована, зокрема, [3].

Мета роботи – порівняти способи прогнозування RUL за трендом HI та оцінити, з якого моменту спостереження прогноз стає придатним для планування.

Для ілюстрації використано синтетичний ряд щотижневих значень HI, що спадає з 0,86 до 0,52 за 52 тижні з прискоренням (як за розвитку дефекту), з випадковою похибкою вимірювання σ = 0,012. Порогом граничного стану умовно прийнято $HI_{гр} = 0{,}3$. Розглянуто два прогнози. Перший – лінійна екстраполяція тренду за останні 12 тижнів:

$$RUL_{лін} = \frac{HI_n - HI_{гр}}{|\beta|}, \qquad (1)$$

де HI_n – згладжене поточне значення; β – нахил тренду, 1/тиж. Другий – квадратична модель деградації, параметри якої визначаються методом найменших квадратів за всіма даними:

$$HI(t) = HI_0 - c\,t^2, \quad RUL_{кв} = \sqrt{\frac{HI_0 - HI_{гр}}{c}} - t_n, \qquad (2)$$

де t_n – поточний тиждень. 90-відсотковий інтервал прогнозу отримано статистичним моделюванням (2000 реалізацій) за коваріаційною матрицею оцінок параметрів. Результати наведено в табл. 1 і на рис. 1.

Таблиця 1 – Прогноз залишкового ресурсу, тиж. (синтетичні дані)

Тиждень спостереження	Фактичний RUL моделі	Лінійна екстраполяція	Квадратична модель [90 % інтервал]
20	46,7	86,9	38,0 [34,3; 42,7]
30	36,7	77,8	34,1 [31,9; 36,6]
40	26,7	46,8	26,6 [25,4; 27,9]

50	16,7	25,6	17,3 [16,6; 18,0]

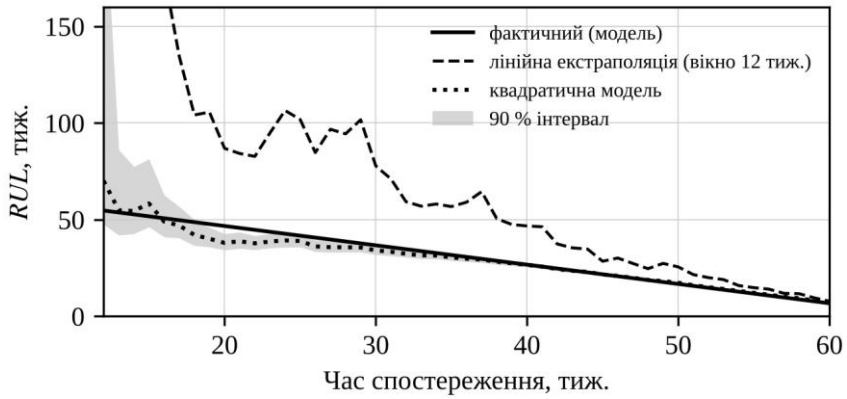


Рис.1. Оцінки залишкового ресурсу залежно від тривалості спостереження

Лінійна екстраполяція систематично завищує ресурс (на 9–40 тижнів), оскільки не враховує прискорення деградації: саме такий прогноз є небезпечним для планування ремонту. Квадратична модель з 40-го тижня дає похибку менше 1 тижня, а її інтервал звужується до ±1–2 тижнів. Водночас на 20-му тижні фактичне значення (46,7) лежить поза 90-відсотковим інтервалом: інтервал враховує лише статистичну похибку параметрів і не враховує похибки вибору форми моделі. Тому на ранній стадії прогноз слід подавати з консервативним запасом або порівнювати кілька моделей деградації.

Прогноз RUL доцільно поєднувати з трендами окремих газів (H_2, C_2H_2, C_2H_4) і швидкістю їх наростання: різке збільшення ацетилену свідчить про дуговий розряд, за якого ресурсна модель втрачає сенс і потрібне позапланове обстеження [3]. Для передавання й зберігання даних моніторингу використовуються принципи, розглянуті в [4; 5].

Висновок. На синтетичному прикладі показано, що прогноз RUL за трендом індексу технічного стану потребує моделі, яка враховує прискорення деградації; лінійна екстраполяція завищує ресурс. Подальша робота передбачає перевірку моделей на відкритих наборах даних DGA, вибір порогів сигналізації за ризиком і врахування невизначеності форми моделі.

Перелік джерел посилань

1. Jahromi A. et al. An approach to power transformer asset management using health index. IEEE Electrical Insulation Magazine. 2009. Vol. 25, No. 2. P. 20–34. DOI: https://doi.org/10.1109/MEI.2009.4802595.

2. Zemouri R. Power Transformer Prognostics and Health Management Using Machine Learning: A Review and Future Directions. Machines. 2025. Vol. 13, No. 2. Art. 125. DOI: https://doi.org/10.3390/machines13020125.

3. IEEE Std C57.104-2019. IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Mineral Oil-Immersed Transformers. New York: IEEE, 2019.

4. Семенов А. О., Павленко В. М., Скрипник В. О. Інтелектуалізація вакуумних вимикачів у мережах середньої та високої напруги. Енергетика і автоматика. 2026. № 2. С. 138–146. DOI: https://doi.org/10.31548/energiya2(84).2026.138.

5. Павленко В. М., Петренко А. В., Мартинюк Л. В., Бунтов М. І., Афінович С. Г. Семантична модель доступу до даних моніторингу якості електричної енергії в автоматизованих інформаційно-вимірювальних системах. Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. 2026. № 2 (28). С. 74–79. DOI: https://doi.org/10.20998/2413-4295.2026.02.10.

УДК 621.311.1:621.316.727

КОМПЛЕКСНЕ ОЦІНЮВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ АВТОНОМНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ З РЕГУЛЬОВАНОЮ КОМПЕНСАЦІЄЮ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

Суддя М. М., здобувач вищої освіти; Макаревич С. С., к.т.н., доцент
Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

Енергоефективність автономного електроживлення домогосподарства від генератора з двигуном внутрішнього згоряння зазвичай оцінюють лише питомою витратою палива b. Проте компенсація реактивної потужності діє насамперед через струмове розвантаження генератора і зниження втрат [1, 2], чого такий показник не відображає. Різнорідні показники доцільно звести до однієї шкали узагальненою функцією бажаності Харрінгтона [3, 4]. Мета роботи – обґрунтувати комплексний показник і межі рівнів енергоефективності системи з компенсованим генератором з урахуванням добового графіка навантаження і способу регулювання компенсувального пристрою (КУ).

Частинні показники: b, л/(кВт·год); середньозважений коефіцієнт потужності на затискачах генератора $\cos\varphi_{зв}$; середній коефіцієнт завантаження $k_{ср}$; відносні електричні втрати в генераторі та лінії δW, %. Частинні бажаності d_i та узагальнений показник D визначали за (1), (2). Коефіцієнти a_{0i}, a_{1i} знайдено з умов $d = 0{,}8$ («добре») і $d = 0{,}2$ («погано») для опорних значень: b – 0,32 і 0,60 л/(кВт·год); $\cos\varphi$ – 0,95 і 0,80; k – 0,75 і 0,30; δW – 1 і 5 %. Добову витрату палива $B_д$ розраховано погодинно за (3):

$$d_i = \exp[-\exp(-(a_{0i} + a_{1i}x_i))], \quad (1)$$

$$D = (d_1 \cdot d_2 \cdot \ldots \cdot d_n)^{1/n}, \quad (2)$$

$$B_д = \Sigma[B_{хх} + a(P_t + \Delta P_t)], \quad \Delta P_t = [P_t^2 + (Q_t - Q_{к,t})^2](R_г + R_л)/U^2, \quad (3)$$

де P_t, Q_t – навантаження в годину t; $Q_{к,t}$ – потужність КУ; $R_г$, $R_л$ – опори обмотки генератора і лінії; $B_{хх}$, a – параметри лінійної характеристики двигуна. Межі рівнів прийнято за шкалою Харрінгтона: «високий» – $D \geq 0{,}63$, «середній» – 0,37…0,63, «низький» – $D < 0{,}37$.

Вихідні дані є умовними: однофазна мережа 230 В, робота з 7:00 до 23:00, добове споживання 34,2 кВт·год за $\cos\varphi = 0{,}72\ldots0{,}88$ (рис. 1), $R_л = 0{,}0875$ Ом, втрати в обмотці 4 % $S_{ном}$, $B_{хх} = 0{,}9$ л/год (для 8 кВт), $a = 0{,}24$ л/(кВт·год). Нерегульована КУ (1,5 квар) вибрана за найбільшою потребою, ступінчаста (крок 0,25 квар) підтримує $\cos\varphi \approx 0{,}98$ без перекомпенсації. У С-5 генератор працює з $k = 0{,}85$ протягом 8,1 год, 60 % енергії проходить через АКБ (ККД 0,85).

Порівняно з С-1 ступінчаста КУ (С-3) зменшує втрати δW на 30 % і підвищує $\cos\varphi_{зв}$ з 0,806 до 0,982, але витрата палива знижується лише на 0,24 % (22,79 → 22,73 л/добу), тому D зростає з 0,21 до 0,30 (табл. 1). Нерегульована КУ

(С-2) дає близькі середні показники, але протягом 8 год створює перекомпенсацію до −0,54 квар (cos φ = 0,88 ємн.), що погіршує регулювання напруги генератора, тому сценарій недопустимий.

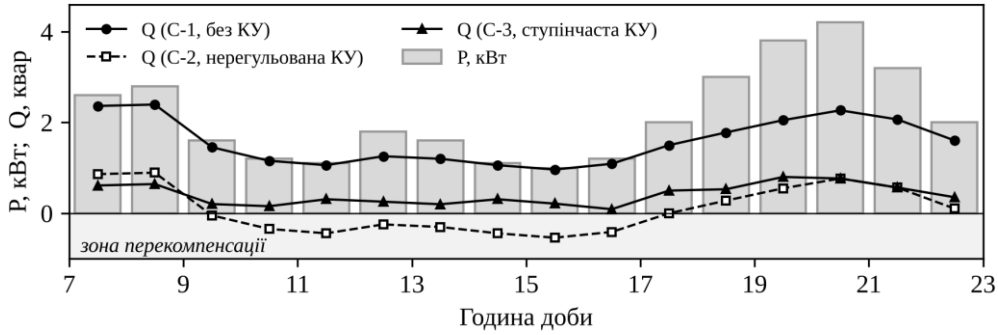


Рис.1. Добовий графік навантаження і реактивна потужність генератора

Таблиця 1 – Частинні та узагальнений показники сценаріїв (умовні дані)

Сценарій	b, л/кВт·год	cos $\varphi_{зв}$	$k_{ср}$	δW, %	D	Рівень ЕЕ
С-1 – генератор 8 кВт, без КУ	0,666	0,806	0,273	2,19	0,21	низький
С-2 – С-1 + нерегульована КУ	0,665	0,975	0,271	1,53	0,30	недопуст.*
С-3 – С-1 + ступінчаста КУ	0,665	0,982	0,271	1,52	0,30	низький
С-4 – С-3, генератор 5,5 кВт	0,534	0,982	0,396	2,01	0,53	середній
С-5 – С-4 + сеансовий режим	0,421	0,980	0,850	4,02	0,65	високий

* 8 год перекомпенсації протягом доби.

Обмежувальним показником у С-1…С-3 є низьке завантаження генератора. Перехід на 5,5 кВт (С-4) знижує b на 19,8 % і переводить систему на «середній» рівень (D = 0,53). Без КУ той самий генератор має D = 0,36 («низький») і запас повної потужності 28,4 % проти 35,9 %: внесок компенсації, непомітний за витратою палива, видно в комплексному показнику. Сеансовий режим з АКБ (С-5) зменшує витрату палива на 36,7 % (14,41 л/добу) і забезпечує «високий» рівень (D = 0,65), проте зосередження навантаження підвищує δW до 4,0 % (d = 0,37), що визначає наступний резерв.

Висновок. Функція бажаності дає змогу обґрунтувати межі рівнів енергоефективності та врахувати ефекти компенсації, яких не відображає питома витрата палива. Для змінного побутового графіка доцільна ступінчаста КУ; «високий» рівень досягається поєднанням компенсованого генератора узгодженого типорозміру із сеансовим режимом. Результати отримано за умовними даними й потребують натурної перевірки.

Перелік джерел посилань

1. Kaplun V., Makarevych S., Chuienko R. Modified compensated asynchronous machine for increasing energy efficiency of autonomous alternator in low-power supply system. Przegląd Elektrotechniczny. 2023. No. 10. P. 178–181. DOI: https://doi.org/10.15199/48.2023.10.34.

2. Chuenko R., Kaplun V., Makarevych S., Sytnyk O. Asynchronous generator replacement scheme with internal capacitive reactive power compensation. Machinery & Energetics. 2023. Vol. 14, No. 4. P. 54–63. DOI: https://doi.org/10.31548/machinery/4.2023.54.

3. Harrington E. C. The desirability function. Industrial Quality Control. 1965. Vol. 21, No. 10. P. 494–498.
4. Derringer G., Suich R. Simultaneous optimization of several response variables. Journal of Quality Technology. 1980. Vol. 12, No. 4. P. 214–219.

УДК 621.311.1:62-192

ДОСЛІДЖЕННЯ НАДІЙНІСНО-ВАРТІСНИХ ПОКАЗНИКІВ МОДЕРНІЗАЦІЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ (НА ПРИКЛАДІ АДМІНІСТРАТИВНОЇ БУДІВЛІ)

Хомко Б. О., здобувач вищої освіти; Макаревич С. С., к.т.н., доцент
Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

Модернізацію системи електропостачання (СЕП) адміністративних будівель зазвичай обґрунтовують нормативною категорією надійності [1, 2] без зіставлення витрат з очікуваним збитком від перерв, що за частих відключень в енергосистемі може призводити до неоптимальних рішень. Мета роботи – порівняти варіанти модернізації СЕП адмінбудівлі за надійнісно-вартісними показниками [3, 4] і визначити раціональний варіант. Такий підхід відповідає плануванню надійності за вартістю збитку споживачів, коли рівень резервування обирають з умови мінімуму сукупних витрат, а не лише за формальними вимогами [3].

СЕП подано послідовно-паралельною моделлю незалежних елементів з параметром потоку відмов ω_i, 1/рік, і часом відновлення $T_{вi}$, год. Для послідовного з'єднання і двох вводів А, Б з АВР:

$$\omega_{\text{пос}} = \sum_i \omega_i,\ T_{\text{нз}} = \sum_i \omega_i T_{вi} \quad (1)$$

$$q_{\text{пар}} = q_А q_Б,\ \omega_{\text{пар}} = \omega_А q_Б + \omega_Б q_А,\ q = \frac{\omega T_в}{8760} \quad (2)$$

де $T_{нз}$ – середній річний час перерв; q – коефіцієнт неготовності. Резерв від дизель-генератора (ДГ) враховано імовірністю невдалого пуску $p_п$; перемикання на резервне джерело вважали короткочасними перервами ($n_к$, 1/рік). Річний збиток і сукупні річні витрати:

$$У = y_0 P_{ср} T_{нз} + y_п \omega + y_к n_к \quad (3)$$

$$З = K \cdot \text{CRF} + В + У,\ \text{CRF} = \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \quad (4)$$

де y_0 – питомий збиток від недовідпущеної енергії; $y_п$, $y_к$ – збиток від однієї тривалої і короткочасної перерви; К – капіталовкладення; В – експлуатаційні витрати (з паливом ДГ); r, n – ставка дисконтування і строк служби.

Вихідні дані умовні: $P_{ср}$ = 60 кВт; системні відключення, спільні для мережевих вводів, – 10 1/рік по 4 год; фідер 10 кВ, ТП і КЛ 0,4 кВ – разом 1,23 1/рік і 7,2 год/рік; $p_п$ = 0,05; y_0 = 150 грн/(кВт·год), $y_п$ = 5 тис. грн, $y_к$ = 3 тис. грн; r = 10 %, n = 15 років. Результати наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Показники варіантів модернізації СЕП (К – тис. грн; В, У, З – тис. грн/рік)

Сценарій	ω, 1/рік	$T_{нз}$, год/рік	$n_к$, 1/рік	ΔW, кВт·год	K, тис. грн	В	У	З
В-0 – існуючий	11,28	47,40	0	2844	0	0	483,0	483,0
В-1 – 2-й ввід + АВР	10,10	40,30	2,46	2418	950	19,0	420,6	564,5
В-2 – ДГ + АВР	0,66	2,66	21,3	160	1150	61,4	91,3	303,9
В-3 – В-1 + В-2	0,65	2,40	21,5	144	2100	76,3	89,2	441,6
В-4 – В-2 + ДБЖ	0,66	2,66	0*	155	1430	75,4	26,5	289,9

* – критичні навантаження 15 кВт перемикаються через ДБЖ без перерви.

Системні відключення становлять 84 % $T_{нз}$ і є спільною причиною відмов обох вводів, тому другий ввід (В-1) зменшує $T_{нз}$ лише на 15 % і збільшує З на 17 %. ДГ (В-2) зменшує $T_{нз}$ у 17,8 раза і З на 37 %, але 70 % залишкового збитку дають короткочасні перерви під час перемикань. ДБЖ для критичних навантажень (В-4) їх усуває і забезпечує мінімум З (−40 % до В-0, окупність 3,8 року). ДГ доцільний за системних відключень понад ≈ 17 год/рік, ДБЖ – за збитку від короткочасної перерви понад 2,35 тис. грн.

Стійкість вибору перевірено за ключовими умовними параметрами. Варіант В-4 залишається вигіднішим за існуючу схему, доки питомий збиток y_0 перевищує 78 грн/(кВт·год), тобто приблизно половину прийнятого значення. За ставки дисконтування r = 15 % сукупні витрати для В-4 зростають до 346 тис. грн/рік (−28 % до В-0), і він лишається найкращим. Погіршення готовності ДГ до $p_п$ = 0,10 збільшує $T_{нз}$ для В-4 до 5,0 год/рік, а З – до 314 тис. грн/рік, що все одно на 35 % менше, ніж для В-0; це обґрунтовує регулярні випробувальні пуски ДГ. Доповнення В-2 другим вводом (В-3) зменшує недовідпуск лише на 16 кВт·год/рік за зростання З на 137,7 тис. грн/рік, тобто кожна додатково збережена кіловат-година коштує ≈ 8,6 тис. грн, що в 57 разів перевищує y_0. Отже, два мережеві вводи формально є незалежними джерелами, але за спільної причини їхніх відмов фактичного резервування не забезпечують.

Висновок. Раціональним є варіант В-4 (ДГ з АВР і ДБЖ): $T_{нз}$ зменшується з 47,4 до 2,7 год/рік, сукупні витрати – на 40 %. Другий мережевий ввід за переважання системних відключень економічно не виправданий. Результати отримано за умовними даними й потребують уточнення для конкретного об’єкта. Для реального проєкту доцільно використати статистику відключень оператора системи розподілу та уточнити питомий збиток для споживачів будівлі.

Перелік джерел посилань

1. ДБН В.2.5-23:2010. Проектування електрообладнання об’єктів цивільного призначення. Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. 166 с.
2. Правила улаштування електроустановок. Київ : Міненерговугілля України, 2017. 617 с.

3. Billinton R., Allan R. N. Reliability Evaluation of Power Systems. 2nd ed. New York : Plenum Press, 1996. 514 p.
4. IEEE Std 493-2007. IEEE Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems (Gold Book). New York : IEEE, 2007. 383 p.

УДК 621.313.333:621.67

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПУСКОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВІДЦЕНТРОВОГО НАСОСА З АСИНХРОННИМ ДВИГУНОМ КЛАСУ IE4

Заблодський М. М., д.т.н., професор; Суржик В. В., аспірант.
Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

Підвищення класу енергоефективності асинхронних двигунів (АД) зменшує втрати в усталеному режимі, проте супроводжується зростанням кратності пускового струму через зниження опору короткого замикання [1, 2]. Для насосних агрегатів, що живляться від автономних джерел обмеженої потужності (інверторів, генераторних установок), саме пусковий режим визначає вимоги до джерела та захисних апаратів. Метою роботи є експериментальне визначення пускових характеристик відцентрового насосного агрегату з АД класу IE4 за різних способів пуску.

Дослідження виконано на стенді з насосом К 50-32 і АД класу IE4 потужністю 2,2 кВт. Порівнювались прямий пуск, пуск пристроєм плавного пуску (ППП) з двофазним і трифазним керуванням [3] та пуск від частотно-регульованого приводу (ЧРП). Реєстрацію виконано аналізатором якості електроенергії ETCR5000 (діюче значення струму за півперіод і осцилограми з частотою дискретизації 3200 Гц). Визначались пусковий струм $I_п$, його кратність $k_п$, тривалість пуску, інтеграл Джоуля $\int i^2 dt$, кидок повної потужності S_{max} і просадка напруги.

Встановлено, що за прямого пуску $I_п$ становить 44–47 А за робочого струму 3,7 А ($k_п$ = 12,6), миттєве значення струму досягає 70 А, тривалість розгону – 0,22 с, S_{max} – 27 кВ·А, просадка напруги – 4–5 %. ППП знижує $k_п$ до 6,1 (двофазне керування) і 4,1 (трифазне), однак подовжує пуск до 10–13 с, унаслідок чого додатковий інтеграл Джоуля зростає з 232 до 728 $А^2$·с, тобто втричі. За двофазного керування струм некерованої фази (22,9 А) на 30–50 % перевищує струми керованих фаз, а за трифазного замикання внутрішнього байпасу до повного відкриття тиристорів спричиняє стрибок струму до 27,5 А. ЧРП практично усуває пусковий кидок ($k_п \approx 1,1$; S_{max} = 3,7 кВ·А), проте в усталеному режимі струм мережі на 35 % більший, ніж за прямого живлення, через гармонічні спотворення (коефіцієнт потужності 0,63 проти 0,85).

Отже, вибір способу пуску є компромісом між амплітудою пускового кидка та тепловим навантаженням двигуна: ППП зменшує кидок у 2–3 рази, але втричі збільшує нагрівання за пуск і обмежує допустиму кількість пусків за годину, тоді як ЧРП є найсприятливішим для живлення від автономних джерел обмеженої потужності. Отримані показники можуть бути використані як вихідні дані для

вибору потужності автономного джерела, захисних і комутаційних апаратів насосних агрегатів та потребують додатково дослідження гармонійних спотворень та впливу їх на прилади автономного живлення.

Перелік джерел посилань

1. de Almeida A. T., Ferreira F. J. T. E., Baoming G. Beyond induction motors – technology trends to move up efficiency. IEEE Transactions on Industry Applications. 2014. Vol. 50, No. 3. P. 2103–2114.
2. IEC 60034-12:2016. Rotating electrical machines – Part 12: Starting performance of single-speed three-phase cage induction motors. Geneva : IEC, 2016.
3. IEC 60947-4-2:2020. Low-voltage switchgear and controlgear – Part 4-2: Contactors and motor-starters – Semiconductor motor controllers, starters and soft-starters. Geneva : IEC, 2020.

УДК 621.867.2:621.314

ЧАСТОТНЕ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ СТРІЧКОВОГО КОНВЕЄРА: ВПЛИВ НА ДИНАМІЧНІ НАВАНТАЖЕННЯ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ

Юрченко О.Ю., PhD, доцент; Лулаков І.О., магістрант; Андрусяк В.О., PhD, старший викладач

Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна

У технологічних лініях перероблення лікарської рослинної сировини стрічковий конвеєр має забезпечувати не лише переміщення матеріалу, а й стабільне його надходження до наступних операцій. Нерівномірність завантаження та повторювані пуски створюють умови, за яких постійна швидкість руху стрічки не завжди відповідає фактичній потребі виробництва. Тому важливим є вибір такого режиму керування електроприводом, який узгоджує продуктивність транспортної ланки з допустимими електромеханічними навантаженнями [1, 2].

За аналітикою було застосовано порівняльний аналіз режимів асинхронного електроприводу з нерегульованою та регульованою швидкістю, узагальнення опублікованих результатів натурних вимірювань конвеєрних систем і функціональний аналіз технологічного транспортування (конвеєр КС-12-500).

За результатами визначальною особливістю частотного керування є можливість формувати закон зміни швидкості, а не лише встановлювати її робоче значення. Плавний розгін обмежує інтенсивність наростання прискорення та зменшує ймовірність ударного передавання зусиль через приводний барабан і стрічку. Водночас надто короткий час розгону здатний викликати підвищені динамічні навантаження, а надмірно тривалий — збільшувати тривалість перехідного процесу. Отже, налаштування привода має враховувати не тільки електричні характеристики двигуна, але й механічну податливість транспортної системи.

Під час випробувань промислового конвеєра з регульованою швидкістю, де зареєстровано зміну швидкості та натягу стрічки [2]. Встановлено, що за використаного алгоритму керування натяг залишався в межах, характерних для роботи з постійною швидкістю; додаткового зростання механічного навантаження під час прискорення й уповільнення не зафіксовано. Цей результат

підтверджує принципову можливість поєднання енергоощадного регулювання зі збереженням допустимого механічного режиму.

На рис. 1 наведено схему інтерпретації експериментального висновку [2]: під час керованої зміни швидкості критерієм належного налаштування є відсутність додаткового пікового натягу порівняно з усталеним режимом.

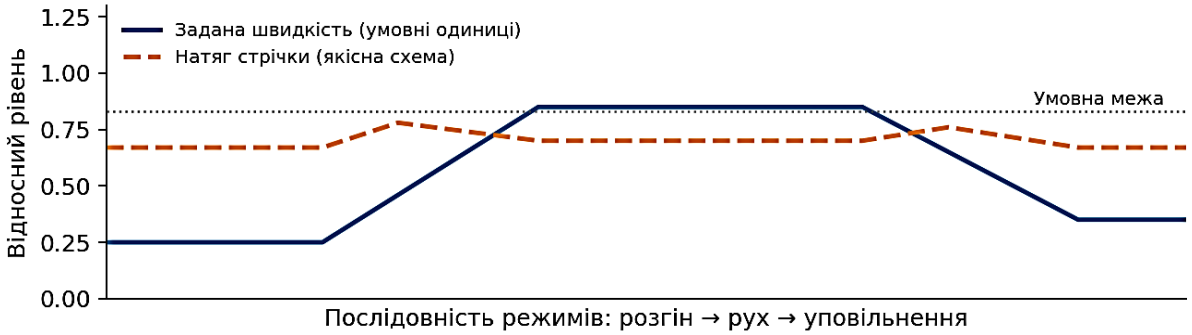


Рис. 1. Схема узгодження зміни швидкості та натягу стрічки за частотного керування [2]

Для транспортування лікарської рослинної сировини швидкість стрічки доцільно узгоджувати з інтенсивністю подавання та роботою суміжного обладнання. Алгоритм керування передбачає послідовний запуск транспортних ланок проти напрямку руху сировини, зупинку після звільнення стрічки, контроль її руху, сходження, перевантаження та аварійне вимкнення.

Енергоефективність частотного регулювання визначається питомими витратами електроенергії на транспортування сировини, а не лише зниженням потужності двигуна. Важливими критеріями також є натяг стрічки, плавність розгону та стабільність технологічного процесу [2, 3].

Отже, частотне керування забезпечує узгодження продуктивності, динамічних навантажень та енергоспоживання. Експериментальні результати підтверджують можливість регулювання швидкості без додаткового зростання натягу стрічки за раціонального закону керування. Для конвеєра КС-12-500 це обґрунтовує показники механічної та технологічної надійності; застосування плавного пуску й зупинки, адаптації швидкості до потоку сировини та захисного блокування.

Перелік джерел посилань

1. Romasevych Yu., Loveikin V., Kulpin R., Pundyk K. Research of Dynamic and Energy Processes of Belt Conveyors under Control with Soft Starter. Machinery & Energetics. 2021. Vol. 12, No. 1. P. 75–82. https://doi.org/10.31548/machenergy2021.01.075

2. Bebic M. Z., Ristic L. B. Speed Controlled Belt Conveyors: Drives and Mechanical Considerations. Advances in Electrical and Computer Engineering. 2018. Vol. 18, No. 1. P. 51–60. https://doi.org/10.4316/AECE.2018.01007

3.Ji J., Miao C., Li X. Research on the energy-saving control strategy of a belt conveyor with variable belt speed based on the material flow rate. PLOS ONE. 2020. Vol. 15, No. 1. e0227992. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0227992

УДК 621.311:004.94

ЦИФРОВІ ДВІЙНИКИ В ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ: ПОНЯТТЯ, ЗАСТОСУВАННЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ

Бабич О. В., здобувач вищої освіти; Павленко В.М., к. т. н., доцент

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна.

Цифровізація енергетики та агропромислового комплексу (АПК) зумовлює потребу в інструментах, які дають змогу в режимі, наближеному до реального часу, оцінювати стан електротехнічного обладнання, прогнозувати його поведінку та оптимізувати режими роботи. Одним із таких інструментів є цифрові двійники (ЦД), які розглядають як одну з ключових технологій Індустрії 4.0 [1].

Термін «цифровий двійник» було формалізовано М. Гривзом у контексті управління життєвим циклом виробів, а первинного розвитку технологія набула в аерокосмічній галузі [1]. У сучасному розумінні ЦД – це віртуальна модель фізичного об’єкта, яка безперервно синхронізується з ним за даними сенсорів і слугує для моніторингу, аналізу та підтримки прийняття рішень. На відміну від статичних розрахункових моделей, ЦД інтегрує потоки вимірювальних даних, фізичні рівняння й алгоритми машинного навчання [1]. Для електроенергетики його доцільно розглядати як трирівневу кіберфізичну систему, що охоплює фізичний рівень, рівень передачі та обробки даних і рівень цифрової моделі [1]. Технологічну основу становлять пристрої Інтернету речей, хмарні та периферійні обчислення, стандарт IEC 61850 [1].

В електротехнічних системах ЦД застосовують у кількох напрямах. Для електричних машин, зокрема двигунів, вони дають змогу діагностувати технічний стан і переходити до обслуговування за фактичним станом [2, 3]. В електричних мережах ЦД використовують для моніторингу, прогнозування стану обладнання, оцінювання залишкового ресурсу та підтримки диспетчерських рішень. На відміну від традиційних SCADA-систем, які забезпечують переважно реактивний контроль, ЦД формують предиктивну спостережність і підтримують сценарне моделювання режимів та аварійних ситуацій без впливу на реальну систему [1]. Окремий напрям – мікромережі з відновлюваними джерелами енергії та накопичувачами, де ЦД забезпечують моніторинг, керування й віртуальне тестування режимів роботи [4]. Для АПК такі рішення можуть бути корисними в електроприводах технологічного обладнання, системах електропостачання ферм і тепличних комплексів, а також в автономних енергоустановках.

Серед основних проблем впровадження ЦД – точність моделей, інтероперабельність, кібербезпека та високі обчислювальні витрати [4]. В умовах України додатково позначаються значний знос обладнання, нерівномірне впровадження стандарту IEC 61850, відсутність уніфікованих галузевих стандартів і ризики кібератак [1].

Перспективи розвитку пов’язують зі створенням розподілених ЦД, інтегрованих із системами штучного інтелекту та периферійними обчисленнями,

що дасть змогу перейти від статичних моделей до самонавчальних енергетичних систем [4]. Для об'єднаної енергосистеми України запропоновано поетапний підхід: від «цифрової тіні» на рівні окремих підстанцій через регіональне масштабування до загальносистемної платформи керування [1].

Таким чином, цифрові двійники є перспективним інструментом підвищення надійності, ефективності та гнучкості електротехнічних систем. Подальші дослідження доцільно спрямувати на уніфікацію підходів до їх побудови, розроблення відкритих стандартів і адаптацію до умов агропромислового сектору.

Перелік джерел посилань

1. Омеляненко Г. В., Гурінчук В. О. Формування концепції поетапного впровадження цифрових двійників в електроенергетиці. Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. 2026. № 1 (12). С. 96–101. DOI: 10.20998/EREE.2026.1(12).360361.
2. Сахошко Т. Г., Плюгін В. Є. Діагностика технічного стану електричних двигунів з використанням цифрових двійників. Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: MicroCAD-2025. Харків, 2025. С. 108.
3. Pliuhin V., Tsegelnyk Y., Slovikovskyi O. Digital Twins of Different Types Electrical Machines. Lighting Engineering & Power Engineering. 2024. Vol. 63, No. 2. P. 35–45.
4. Шиманюк П. В., Сичова В. В., Блінов І. В. Цифрові двійники мікромереж: концепції, архітектури та виклики. Праці Інституту електродинаміки НАН України. 2025. Вип. 72. DOI: 10.15407/publishing2025.72.005.

УДК 631.365:621.318.3

РОЗРОБЛЕННЯ І ДОСЛІДЖЕННЯ ВІБРАЦІЙНОЇ ЛОТКОВОЇ СУШАРКИ З ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМ ПРИВОДОМ ДЛЯ СУШІННЯ СИПУЧОЇ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ПРОДУКЦІЇ

Котляр Т. А., магістр 2 року навчання; Червінський Л. С., д.т.н., професор
Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна.

Сушіння є одним із найбільш енергоємних процесів післязбиральної обробки сільськогосподарської продукції, а якість висушеного зерна і насіння безпосередньо визначає їх збереженість і посівні властивості [1]. Поширені шахтні та барабанні сушарки характеризуються нерівномірністю нагрівання шару, ризиком пересушування і травмування зернівок, значною металоємністю.

Перспективним напрямом інтенсифікації сушіння сипучих матеріалів є віброкиплячий шар, у якому вібрація робочого органу забезпечує розпушення продукту, оновлення поверхні контакту частинок із теплоносієм та одночасне транспортування матеріалу [2]. Так, у промисловій віброкиплячій сушарці рису-сирцю продуктивністю 2,5–5 т/год за інтенсивності вібрації 1 (частота 7,3 Гц, амплітуда 5 мм) двигуни вентилятора і вібратора споживали близько 55 % потужності вентилятора сушарки з псевдозрідженим шаром без вібрації, а питомі витрати первинної енергії становили 6,15 МДж/кг випареної вологи [3]. Для насіннєвого матеріалу визначальним є низькотемпературний режим: у вібраційній барабанній сушарці за амплітуди коливань до 2 мм і температури

теплоносія 40–50 °С схожість насіння ячменю зберігалася на рівні 95–93 %, максимальна швидкість сушіння становила 0,155–0,181 %/хв, а підвищення температури на 10 °С скорочувало тривалість процесу на 12 % [4].

Відомі віброкиплячі сушарки оснащуються переважно дебалансними або ексцентриковими приводами [3, 4]. Нами запропоновано електромагнітний вібропривод, який не має обертових частин і підшипникових вузлів, живиться безпосередньо від мережі та дозволяє плавно регулювати амплітуду коливань зміною напруги на обмотці електромагніта [5, 6]. Робота коливальної системи в близькорезонансному режимі забезпечує необхідну амплітуду за мінімальної споживаної потужності.

Розроблена сушарка містить лоток із перфорованим дном, встановлений на плоских пружних елементах так, що напрямок коливань становить 20…30° із площиною лотка. Сушильний агент, нагрітий у калорифері з трубчастими електронагрівачами, подається вентилятором під перфороване дно. Електромагнітний вібратор складається з Ш-подібного шихтованого осердя з котушкою, закріпленого на реактивній масі, та якоря, з'єднаного з лотком. Живлення котушки через однонапівперіодний випрямляч забезпечує частоту коливань 50 Гц, тиристорний регулятор напруги – регулювання їх амплітуди, ПІД-регулятор – підтримання температури сушильного агента 40–50 °С для насіннєвого матеріалу [4].

Режим віброкипіння характеризується коефіцієнтом інтенсивності вібрації $\Gamma = A\omega^2/g$, де A – амплітуда, ω – колова частота коливань, g – прискорення вільного падіння. Віброкипіння шару настає за $\Gamma > 1$; за частоти 50 Гц значенням Γ = 1,5…4 відповідає амплітуда лише 0,15…0,4 мм, що значно менше граничних 2 мм [4] і знижує динамічні навантаження на конструкцію. Тягове зусилля електромагніта $F = B^2S/(2\mu_0)$ нелінійно залежить від повітряного зазору, тому динаміка лотка описується моделлю двомасової коливальної системи «реактивна маса – лоток із продуктом» [5, 6]. Оцінка за даними [4] показує, що для зниження вологості насіння з 19,2 до 14 % за максимальної швидкості сушіння 0,181 %/хв продукт має перебувати в зоні сушіння не менше 29 хв. За довжини лотка 1,5 м це відповідає середній швидкості транспортування не більше 0,05 м/хв, тому в конструкції передбачено рециркуляцію продукту з багаторазовим проходженням лотка, а тривалість кожного проходу регулюється амплітудою коливань.

Подальші експериментальні дослідження передбачають визначення впливу амплітуди коливань, температури і швидкості сушильного агента та висоти шару на кінетику сушіння, питомі енерговитрати і посівні якості насіння з використанням планування багатофакторного експерименту.

Використання електромагнітного вібраційного приводу в лотковій сушарці дає змогу поєднати інтенсифікацію тепломасообміну у віброкиплячому шарі, низькотемпературний режим сушіння насіння і безступінчасте регулювання тривалості перебування продукту в зоні сушіння за відсутності обертових частин приводу.

Перелік джерел посилань

1. Mujumdar A. S. (Ed.) Handbook of Industrial Drying. 4th ed. Boca Raton : CRC Press, 2014.

2. Kudra T., Mujumdar A. S. Advanced Drying Technologies. 2nd ed. Boca Raton : CRC Press, 2009.
3. Wetchacama S., Soponronnarit S., Jariyatontivait W. Development of a commercial scale vibro-fluidized bed paddy dryer. Kasetsart Journal (Natural Science). 2000. Vol. 34, No. 3. P. 423–430.
4. Paziuk V., Dub V., Tereshkin O., Zahorulko A., Lebedynets I., Pankov D., Hotvianska A. Improving the operation of a drum grain dryer with justification of the low-temperature mode parameters. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020. No. 5/8 (107). P. 24–30. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.213867.
5. Повідайло В. О. Вібраційні процеси та обладнання : навч. посіб. Львів : Вид-во Нац. ун-ту «Львівська політехніка», 2004.
6. Ланець О. С. Високоефективні міжрезонансні вібраційні машини з електромагнітним приводом (Теоретичні основи та практика створення) : монографія. Львів : Вид-во Нац. ун-ту «Львівська політехніка», 2008.

УДК 621.313.3

ЦИФРОВИЙ ДВІЙНИК ПОЛІФУНКЦІОНАЛЬНОГО ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ДЛЯ БІОГАЗОВИХ УСТАНОВОК

Клендій П.Б., к.т.н., доцент
Західноукраїнський національний університет, м. Тернопіль, Україна

Сучасний розвиток електромеханічних систем характеризується широким застосуванням цифрових технологій проектування, серед яких особливе місце займає концепція цифрового двійника (Digital Twin). Технологія цифрових двійників, що вирізняється високими можливостями віртуального відображення характеристик реальних об’єктів, відкриває для цього нові перспективи.[1]

Проблема ефективної експлуатації електродвигунів насамперед пов’язана з надійністю ізоляції. Водночас наразі не існує пристрою, який міг би відобразити для оператора (хоча б приблизне) значення залишкового ресурсу ізоляції та попередити про можливі аварійні ситуації у разі зростання струмових навантажень на обмотки електричної машини. Для вирішення цього завдання можна застосувати сучасні технології, що ґрунтуються на концепції цифрових двійників.[2] Цифровий двійник поліфункціонального електромеханічного перетворювача представляє собою сукупність взаємопов'язаних математичних моделей, які в режимі реального часу описують електромагнітні, механічні та теплові процеси, що відбуваються в електричній машині. На відміну від стандартного цифрового двійника асинхронного двигуна, у машині необхідно враховувати: зовнішній трубчастий ротор довжиною 700 мм, активну електромагнітну довжину лише 164 мм, повітряний проміжок 1 мм, навантаження від лопатей, яке змінюється приблизно пропорційно квадрату швидкості, підвищені вихрові струми у сталевій трубі, оскільки вона є суцільною, нерівномірний розподіл магнітного потоку вздовж осі через різницю між активною та повною довжиною ротора. Для експериментальної машини із зовнішнім феромагнітним ротором цифровий двійник складається з таких взаємопов'язаних моделей: геометрична модель машини визначається вектором конструктивних параметрів . Активна довжина використовується лише в електромагнітній моделі, тоді як повна довжина ротора застосовується для

визначення маси, моменту інерції та механічної жорсткості. Електромагнітна модель, при живленні трифазної обмотки в якій виникає система струмів, унаслідок цього формується обертове магнітне поле. Механічна модель описує рух ротора . Теплова модель визначає нагрів машини.

Стан цифрового двійника описується вектором: $x = \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \\ \omega \\ T \end{bmatrix}$,

керуючий вектор : $u = \begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix}$, вихідний вектор: $y = \begin{bmatrix} n \\ M \\ P \\ T \\ \eta \end{bmatrix}$

Рівняння цифрового двійника:

повна модель

$$y = f(x, u, p)$$

де: p - конструктивні параметри машини

Після запуску цифрового двійника виконується така послідовність: завантаження конструктивних параметрів, ініціалізація змінних стану, формування трифазної системи живлення, обчислення магнітного поля, визначення вихрових струмів, обчислення електромагнітного моменту, розрахунок швидкості ротора, розрахунок моменту навантаження, визначення теплових втрат, розрахунок температури, аналіз технічного стану, запис результатів.

Цифровий двійник експериментальної електричної машини є програмно-математичний комплекс, який безперервно обчислює електромагнітний, механічний та тепловий стан машини на основі конструктивних параметрів і виміряних експлуатаційних даних. На відміну від звичайної математичної моделі, цифровий двійник забезпечує: безперервне оновлення параметрів; прогнозування технічного стану; моделювання аварійних режимів; оцінювання залишкового ресурсу; оптимізацію режимів роботи.

Цифровий двійник може використовуватися для: моніторингу технічного стану експериментальної машини; прогнозування температурних режимів; оптимізації режимів перемішування субстрату; оцінювання енергоефективності; зменшення ризику аварійних режимів; накопичення експлуатаційних даних для подальшого вдосконалення моделі.

Перелік джерел посилань

1.DING, Y., NING, G., JIN, K., SUN, B., LI, H., & SU, X. (2026). Fault data generation for electromechanical systems based on hierarchical Digital Twin. Hangkong Xuebao/Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 47(8), Article 432663. https://doi.org/10.7527/S1000-6893.2025.32663

2.Vladyslav Pliuhin, Sergiy Zaklinskyy, Sergiy Plankovskyy, Yevgen Tsegelnyk, Oleksandr Aksonov, Volodymyr Kombarov A DIGITAL TWIN DESIGN OF INDUCTION MOTOR WITH SQUIRREL-CAGE ROTOR FOR INSULATION CONDITION PREDICTION International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics, 2023 P 185-191

УДК 621.3

ІНТЕГРАЦІЯ ЦЕНТРІВ ОБРОБКИ ДАНИХ В ЖИТЛОВІ ТА ГРОМАДСЬКІ БУДІВЛІ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

Литвин В.І., аспірант,

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

Постановка проблеми. Збільшення потреби в обчислювальних потужностях, зокрема для забезпечення функціонування алгоритмів штучного інтелекту потребує суттєвого нарощування виробництва електричної енергії [1], а також будівництво нових електричних мереж. За інформацією Міжнародного енергетичного агентства потреба в енергії може подвоїтися до 2030. Пошук шляхів зменшення затрат на будівництво нових дата-центрів та їх подальше функціонування є надзвичайно актуальним в нинішніх умовах.

Мета дослідження. Сервери можуть розглядатися не лише як частина інформаційної але і як частина енергетичної системи, що можна використати для вирішення ряду задач енергетичних систем, а саме: балансування навантаження енергетичних мереж [2, 3] за рахунок розподілу задач з обчислення між різними енергосистемами або їх частинами, використання скидної теплоти в теплоенергетичних системах, завантаження відновлювальних джерел енергії в періоди надлишкової пікової генерації.

Результати дослідження. Передача інформації між центрами обробки даних є на декілька порядків менш енергозатратною ніж передача енергії для обробки такої інформації - то за наявності надлишкових обчислювальних потужностей матимемо можливість передавати не енергетичні потоки (з відповідними втратами в мережі та необхідністю збільшувати пропускну здатність ліній електропередач), а еквівалентну такій потужності кількість інформації.Зважаючи на те, що побічним продуктом роботи обчислювальних систем є теплова енергія, можна розрахувати еквівалент між обчислювальною потужністю дата центрів та тепловою та електричною потужністю, що дозволить моделювати енергетично-обчислювальні системи. З огляду на можливість виконання розподілених обчислень, розміщення порівняно невеликих дата-центрів в будівлях, що споживають теплову та електричну енергію, а також можуть мати надлишок власної генерації (наприклад сонячні електростанції) дозволяє знизити сумарні затрати як на енергозабезпечення об’єктів так і на виконання обчислень (з огляду на те, що вартість електричної енергії має найбільшу долю в експлуатаційних витратах дата-центрів). В таблиці 1 наведені результати моделювання роботи інтегрованої енергоінноваційної системи в порівнянні з варіантом, коли центри обробки даних не інтегровані в енергетичну систему будівель.

Висновки. Встановлення інформаційних систем в будівлі житлового та адміністративного призначення дозволяють суттєво підвищити ефективність використання енергетичних ресурсів та потужності вже існуючих ліній електропередач.

Перелік джерел посилань
1. Energy demand from AI. International Energy Agency. 2025. URL: https://www.iea.org/reports/energy-and-ai/energy-demand-from-ai (дата звернення: 30.09.2026).
2. Rajasekar R., Mohammed Ansar Ali M. A. Energy Balancing in Data Centre Networks through Green Cloud Computing. International Journal of Scientific Engineering and Research (IJSER). 2014. Vol. 2, iss. 3. P. 37–40.
3. Carlinet Y., Perrot N. Energy-efficient load balancing in a SDN-based Data-Center network. 2016 17th International Telecommunications Network Strategy and Planning Symposium (Networks) (Montreal, QC, Canada, 26–28 Sept. 2016). IEEE, 2016. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/7751166 (дата звернення: 30.09.2026).
4. Artificial intelligence: How much energy does AI use? United Nations Regional Information Centre (UNRIC). 2025. URL: https://unric.org/en/artificial-intelligence-how-much-energy-does-ai-use/ (дата звернення: 30.09.2026).

УДК 621.327.539

ВПЛИВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА ПРИВОДНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГНОЄПРИБИРАЛЬНИХ ТРАНСПОРТЕРІВ

Синявський О. Ю., к.т.н., доцент; Коваль В. В., студент магістратури
Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна.

Нині встановлено, що найбільший вплив на електроприводи виробничих машин і механізмів мають відхилення та несиметрія наруги. послідовністю (38 %) [1].

Хоча за EN50160 середньоквадратичне відхилення напруги повинно бути в межах ±10 %, але в реальності ці показники можуть значно відрізнятися від норми, наприклад, в Україні відхилення напруги буває від -20 % до +30 % [1].

Мета дослідження – встановлення впливу відхилення та несиметрії напруги на технологічні і енергетичні характеристики гноєприбиральних транспортерів.

При відхиленні і несиметрії напруги асинхронний двигун працює на робочій частині механічної характеристики, яку можна вважати лінійною [2].

При відхиленні напруги механічна характеристика електродвигуна на робочій ділянці опишеться рівнянням:

$$M_д = \beta_д U_*^2 (\omega_0 - \omega), \quad (1)$$

де $M_д$ – момент двигуна, Н·м; $\beta_д$ – жорсткість механічної характеристики електродвигуна, Н·м·с; U_* - напруга у відносних одиницях; ω_0 – синхронна кутова швидкість, с$^{-1}$; ω – задана кутова швидкість, с$^{-1}$,

а при несиметрії напруги

$$M_д = \beta_{дa*} \beta_{дн} (\omega_0 - \omega), \quad (2)$$

де $\beta_{дa*} = \beta_{дa}/\beta_{дн}$ – жорсткість механічної характеристики електродвигуна при несиметрії напруги у відносних одиницях; $\beta_{дa}$ – жорсткість механічної характеристики електродвигуна при несиметрії напруги; $\beta_{дн}$ – жорсткість механічної характеристики електродвигуна при номінальній симетричній напрузі, Н·м·с.

Механічна характеристика гноєприбиральних транспортерів: [3]:

$$M_c = M_{сн}, \qquad (3)$$

де $M_{сн}$ – момент статичних опорів при номінальній кутовій швидкості, Н·м.

В усталеному режимі роботи

$$\beta_д U_*^1(\omega_0 - \omega) = M_{сн}, \qquad (4)$$

$$\beta_{дa*}\beta_{дн}(\omega_0 - \omega) = M_{сн}. \qquad (5)$$

Продуктивність гноєприбирального транспортера прямо пропорційна кутовій швидкості електродвигуна:

$$Q_* = \omega_*. \qquad (6)$$

Тоді закон зміни продуктивності гноєприбирального транспортера при зміні напруги запишеться у вигляді:

$$Q_* = \frac{\omega_0}{\omega_н} - \frac{M_{сн}}{\beta_д \omega_н U_*^2}, \qquad (7)$$

а при несиметрії напруги

$$Q_* = \frac{\omega_0}{\omega_н} - \frac{M_{сн}}{\beta_д \beta_{дa*} \omega_н} \qquad (8)$$

Відхилення та несиметрія напруги впливають також на енергетичні характеристики гноєприбирального транспортера, однією з яких є питома витрата електроенергії, кВт·год/кг, яка визначається так:

$$q = P_1 / Q, \qquad (9)$$

де P_1 – потужність, споживана електродвигуном з мережі, кВт.

У відносних одиницях вираз (9) має вигляд:

$$q_* = \frac{P_2 + \Delta P_c + \Delta P_v}{P_{2н} + \Delta P_{сн} + \Delta P_{vн}} \cdot \frac{Q_н}{Q} = \frac{P_2 + \Delta P_{vн}(\alpha + \Delta P_v / \Delta P_{vн})}{P_{2н} + \Delta P_{vн}(\alpha + 1)} \cdot \frac{Q_н}{Q}, \qquad (10)$$

де $P_{2н}$ и P_2 – відповідно потужність на валу двигуна при номінальній і відмінній від номінальної напрузі; $\Delta P_{сн}$ і ΔP_c – постійні втрати потужності; $\Delta P_{vн}$ і ΔP_v – змінні втрати потужності; α – коефіцієнт втрат.

Враховуючи, що номінальні втрати потужності

$$\Delta P_н = P_{2н} \frac{1 - \eta_н}{\eta_н} = \Delta P_{vн}(\alpha_н + 1), \qquad (11)$$

де α – коефіцієнт втрат; $\eta_н$ – ККД двигуна при номінальній напрузі,

тоді питома витрата електроенергії при відхиленні напруги

$$q_* = = \eta_н + \frac{1 - \eta_н}{(\alpha_н + 1)} \cdot \frac{(\alpha + 1/\mathrm{U}_*^2)}{Q_*} \quad , \qquad (12)$$

а при несиметрії напруги

$$q_* = \eta_н + \frac{1 - \eta_н}{(\alpha + 1)} \cdot \frac{(\alpha_a + 1/\beta_{дa*})}{Q_*}. \qquad (13)$$

Висновок. При зниженні та несиметрії напруги зменшується жорсткість механічної характеристики електродвигуна. При цьому зростає ковзання та втрати потужності. Внаслідок цього зменшується продуктивність та зростають питомі витрати електроенергії в електроприводі гноєприбиральних

транспортеріва. На основі проведених досліджень встановлено, що при зниженні напруги на 20 % продуктивність гноєприбиральних транспортерів знижується до 3 %.

Перелік джерел посилань

1. Szultka A., Szultka S., Czapp S., Zajczyk R. Voltage Variations and Their Reduction in a Rural Low-Voltage Network with PV Sources of Energy. Electronics 2021, *10*(14), 1620
2. Лавріненко Ю.М., Савченко П.І., Синявський О.Ю. та ін. Основи електропривода. К.: Видавництво Ліра-К, 2016. 524 с.
3. Синявський О.Ю., Савченко В.В., Лавріненко Ю.М. та ін. Електропривод виробничих машин і механізмів. К.: ФОП Ямчинський О.В., 2020. 444 с.

УДК 621.3

РОЗВИТОК МЕТОДА ДІАГНОСТИКИ МОДУЛІВ СИСТЕМ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ ЗЧИТУВАННЯ ДАНИХ ІЗ ШИНИ ОБМІНУ

Яцун О.В., к.ф.-м.н., асистент; Шван А.В., студент; Швець О.Б., студент;
Національний університет біоресурсів і природокористування України, м.Київ, Україна.

У зв’язку із останніми подіями системи альтернативного і резервного електрозабезпечення набули особливої важливості. Зазвичай, названі системи мають модульну організацію: акумулятор, інвертор, генератор, і т.п. Якщо раніше, задача технічної сумісності і узгодженості модулів не стояла так гостро, то зараз, із розвитком технологій та стрімким зростанням кількості виробників елементів систем електрозабезпечення, така задача актуалізувалась. Тому поруч із давно відомим у даній галузі комунікаційним інтерфейсом RS (Recommended standard) 232 або 485 [1], з’явився інтерфейс CAN (Controller area network) [2], що був нетиповим для енергетики, але добре відомий в індустрії рухомих машин (автомобілів, дорожньої, сільськогосподарської техніки). Широке залучення електронних засобів контролю і керування у системи енергозабезпечення та їх блочна архітектура зумовило появу CAN інтерфейса у цій галузі, як такого, що забезпечує більш глибоку і універсальну інтеграцію модулів між собою.

Застосування CAN інтерфейсу у системах енергозабезпечення вимагає розробки методів спостереження за параметрами роботи і діагностики модулів системи за допомогою незалежного від виробника зчитування даних із CAN шини, оскільки штатні засоби діагностики зазвичай обмежені або взагалі відсутні. Одержавши інформацію із CAN шини на найнижчому (фізичному) рівні, постає задача її коректної інтерпретації – встановлення зв’язків між ID CAN пакета і пов’язаних із ними фізичних параметрів, а також декодування поля даних пакета. Загалом, опрацювання задачі розробки методів діагностики модулів систем електро- та енергозабезпечення може складатися із наступних етапів: а) Вибір конкретної системи або окремого модуля для дослідження з точки зору перспективності такої роботи; б) Підбір технічної бази та програмного забезпечення для зчитування внутрішньої (службової) інформації із системи/модуля через CAN інтерфейс; в) Встановлення типу протоколу, що застосований у CAN інтерфейсі,

та вивчення цього протоколу. Цей пункт логічно пов'язаний із попереднім пунктом. г) Проведення емпіричних досліджень для встановлення кореляцій між робочими параметрами системи/модуля в умовах реальної роботи і відповідними полями даних CAN пакетів. д) Формування відповідної бази даних для CAN ID і бітів поля даних CAN пакетів для формування методичної бази з метою спостереження і діагностики за системами енергозабезпечення, що комунікують за CAN протоколом. Останні два пункти є найбільш складними і трудоємкими, але і найважливішими.

Перелік джерел посилань

1. https://www.sameskydevices.com/blog/rs-485-serial-interface-explained.
2. https://www.csselectronics.com/pages/can-bus-simple-intro-tutorial.

УДК 621.316.925:621.317.3

ВИЗНАЧЕННЯ ЗМІНИ РІВНЯ СИНУСОЇДАЛЬНОЇ НАПРУГИ МЕРЕЖІ ЗА ШВИДКІСТЮ ЗМІНИ ЇЇ ФРОНТУ ЯК ЗАСІБ ПІДВИЩЕННЯ ШВИДКОДІЇ ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ

Афінович С. Г., аспірант; Кривоносов В. Є., д.т.н., професор
Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

Зростання частки нелінійних навантажень, силової електроніки та розподіленої генерації робить параметри якості електроенергії випадково змінюваними, а збурення — короткочасними і швидкоплинними [1]. Чутливість і достовірність систем захисту електрообладнання за таких умов визначаються передусім тим, наскільки швидко вимірювальний орган здатен зафіксувати зміну рівня напруги. Традиційні засоби — електромеханічні та мікропроцесорні реле напруги, прилади контролю якості електроенергії за IEC 61000-4-30 [2] — оцінюють діюче або амплітудне значення, тому висновок про зміну рівня формується не раніше ніж за чверть–півперіоду промислової частоти (5–10 мс), а при повільному зростанні напруги — за кілька періодів. Час спрацювання реле напруги РН-53 та РН-54 становить 0,03–0,15 с [3]. Подія виявляється вже після її розвитку, що обмежує можливість випереджувального впливу на електрообладнання.

У роботі, розвиваючи підхід [4], запропоновано використовувати як інформативну ознаку не амплітуду, а швидкість зміни фронту миттєвих значень напруги на кожній ділянці кроку дискретизації $\Delta\tau$:

$$V_i = \frac{U_{i+1} - U_i}{\Delta\tau}, \qquad (1)$$

де U_i, U_{i+1} — миттєві значення напруги на початку та в кінці ділянки [i; i+1]. Для номінальної напруги швидкості $V_{i,ном}$ на всіх ділянках періоду обчислюються заздалегідь і приймаються базовими; при відхиленні напруги від номінального значення на тих самих ділянках визначається коефіцієнт кратності зміни швидкості фронту

$$K_i = \frac{V_i}{V_{i,\text{ном}}}. \qquad (2)$$

Оскільки швидкість зміни синусоїди на фіксованій фазовій ділянці пропорційна її амплітуді, відхилення K_i від одиниці є ознакою зміни рівня напруги, а підтвердження на наступній ділянці виключає хибне спрацювання від одиничного викиду. Рішення формується за 1–2 кроки дискретизації незалежно від фази, на якій відбулася зміна, тобто без очікування амплітудного значення.

Апробацію способу виконано на лабораторній установці: трифазний регулятор напруги РНТ 220912 (12–230 В, до 32 А), осцилограф OWON XDS3104E як опорний засіб, вимірювальний блок на мікроконтролері ARM Cortex-M4 (168 МГц) з вісьмома синхронними каналами (чотири напруги та чотири струми), 16-розрядним АЦП і частотою 5000 вимірювань за секунду на канал (крок ≈ 0,2 мс; дискретність за напругою ≈ 67 мВ, за струмом ≈ 3 мА). Амплітуду напруги змінювали в межах від $0{,}4U_{\text{н}}$ до $5U_{\text{н}}$. Графіки швидкостей V_i для різних амплітуд підтвердили, що швидкість зміни фронту на відповідних ділянках є однозначним критерієм рівня напруги. При раптовому зниженні напруги з $U_{\text{н}}$ до $0{,}4U_{\text{н}}$ зміну рівня зафіксовано вже на першій ділянці дискретизації та підтверджено на наступній, тобто за 0,2–0,4 мс — щонайменше у 4–5 разів швидше, ніж при вимірюванні амплітудного значення. Оскільки вимірювання є складовою загального часу спрацювання захисту (вимірювання і порівняння з уставкою, робота логічної частини, вимкнення вимикача), скорочення часу визначення рівня напруги зменшує час спрацювання релейного захисту приблизно на 25 %.

За результатами апробації подано заявки на винахід № a202601320 та на корисну модель № u202601315 від 10.03.2026 (МПК G01B 7/004) [5]. Спосіб реалізується на серійній елементній базі — мікроконтролері з ядром ARM Cortex-M4 і синхронному багатоканальному АЦП — без спеціалізованих обчислювальних платформ і може бути покладений в основу вимірювальних органів мікропроцесорного релейного захисту, систем керування симісторно-релейними стабілізаторами напруги та засобів прогнозування перенапруг. Подальші дослідження спрямовано на статистичну оцінку достовірності спрацювання за коефіцієнтом кратності в умовах випадково змінюваних несиметрії, несинусоїдальності та відхилень напруги на стенді автономної трифазної мережі [6].

Перелік джерел посилань

1. Caicedo J. E., Agudelo-Martínez D., Rivas-Trujillo E., Meyer J. A Systematic Review of Real-Time Detection and Classification of Power Quality Disturbances. Protection and Control of Modern Power Systems. 2023. Vol. 8, No. 3. https://doi.org/10.1186/s41601-023-00277-y.

2. IEC 61000-4-30:2015. Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-30: Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods. Geneva: IEC, 2015. 138 p.

3. Релейний захист в системах електропостачання: монографія / Є. І. Сокол, В. Є. Кривоносов та ін.; за заг. ред. Є. І. Сокола. Харків: Бровін О. В., 2023. 424 с.

4. Кривоносов В. Є., Павлов С. В., Злепко С. М. Швидкісна характеристика фронту напруги як інформаційний параметр у системах діагностики і захисту РКТ. Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки. 2017. Вип. 35. С. 134–141.

5. Спосіб швидкого визначення зміни рівня синусоїдальної напруги мережі: заявка на винахід № a202601320; заявка на корисну модель № u202601315 (Україна), МПК G01B 7/004; заявник НУБіП України; подано 10.03.2026.

6. Афінович С. Г., Кривоносов В. Є. Розробка автономної мережі для дослідження динамічної зміни функціональних параметрів. Цифрові технології в енергетиці і автоматиці: матеріали IV Міжнар. наук.-практ. конф. (Київ, 5 червня 2026 р.). Київ: НУБіП України, 2026.

УДК 631.365

ІДЕНТИФІКАЦІЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧИХ РЕЖИМІВ ІЧ-МІКРОНІЗАЦІЇ ЗЕРНА

Калініченко Р. А., к.т.н., доцент

ВП НУБіП України «Ніжинський агротехнічний інститут»,
м. Ніжин, Україна

Інфрачервона (ІЧ) мікронізація зерна – перспективна електротехнологія післязбиральної обробки. Інтенсивний підвід ІЧ-випромінювання спричиняє швидке нагрівання, випаровування вологи, структурні зміни крохмалю та знезараження поверхні зернівки. Водночас мікронізація при безперервному ІЧ-опроміненні характеризується значною енергоємністю (150–250 кВт·год/т) і ризиком перегрівання поверхні. Підвищення енергоефективності пов’язане з обґрунтуванням осцилюючих режимів, за яких періоди нагрівання чергуються з охолодженням поверхні зерна.

Метою дослідження є ідентифікація закономірностей тепло- і масопереносу процесу ІЧ-мікронізації та обґрунтування енергозберігаючих режимів імпульсного енергопідведення без перегрівання поверхні зернівки. Використано математичне моделювання, експериментальні вимірювання температури й вологості та параметричну ідентифікацію моделі.

Зернівку апроксимовано кулею, а процес нагрівання і зневоднення описано системою рівнянь тепломасопереносу на основі підходу О. В. Ликова та попередніх досліджень [1]. Вплив внутрішнього пароутворення й фазових перетворень у спрощеній моделі враховано через ефективні коефіцієнти температуро- та масопровідності:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a_{ef}(U) \cdot \left[\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial r}\right]$$

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = a_{mef}(\theta) \cdot \left[\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial U}{\partial r}\right]$$

де θ – температура зерна, °C; U – вологовміст, кг/кг сухої речовини; τ – час, с; r – радіальна координата, м; a_{ef} та a_{mef} – ефективні коефіцієнти переносу, м²/с. Граничні умови враховують радіаційний і конвективний теплообмін. Зміну поглинальної здатності поверхні зерна за його вологовмістом представлено емпіричною залежністю $A\lambda(U) = 0{,}62 - 0{,}59U$.

Експериментальні дослідження виконували на вібраційному стенді з керамічними ІЧ-випромінювачами за енергетичної освітленості 25 кВт/м². Температуру поверхні та центральної частини зернівки визначали пірометром і термопарою, а вологовміст – методом висушування в сушильній шафі. За кінетикою нагрівання й зневоднення виділено три характерні стадії: початкове випаровування поверхневої вологи; інтенсивне пароутворення зі зростанням

внутрішнього тиску та «вибуховим» руйнуванням структури; кінцеве зневоднення зерна з стрімким зростанням температури.

Параметричну ідентифікацію здійснено за експериментальними даними з використанням алгоритму Левенберга–Марквардта в середовищі Mathcad. Визначали ефективні коефіцієнти a_{ef} та a_{mef} та критерії тепло- й масообміну Bi і Bi_m. Встановлено залежність температуропровідності від вологовмісту, а масопровідності – від температури. Це дає змогу відтворювати змінну інтенсивність нагрівання й вологовидалення на різних стадіях мікронізації без використання зонального методу.

Аналіз розрахункових температурних і вологісних полів засвідчив доцільність чергування ІЧ-опромінення з примусовим охолодженням поверхні зерна. Під час відлежування знижується температура поверхні, перерозподіляється акумульована теплота в зернівці та змінюються градієнти переносу. Наступний імпульс випромінювання забезпечує продовження інтенсивного нагрівання за меншого ризику підгоряння зовнішніх шарів, що особливо важливе для збереження якості продукту.

За результатами моделювання раціональним є осцилюючий режим із поступовим збільшенням тривалості охолодження в наступних циклах. Згідно з отриманими результатами, його застосування забезпечує зниження енерговитрат на 20–30 % та збільшення вологовидалення приблизно на 20 % порівняно з безперервним опроміненням [2]. Отже, запропонована модель з експериментально ідентифікованими коефіцієнтами може бути використана для вибору тривалості імпульсів ІЧ-нагрівання та проміжків охолодження, а також для розробки систем автоматизації енергозберігаючих режимів мікронізації зерна.

Перелік джерел посилань

1. Bandura V., Kalinichenko R., Kotov B., Spirin A. Theoretical rationale and identification of heat and mass transfer processes in vibration dryers with IR-energy supply. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Vol. 4, No. 8(94). P. 50–58. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.139314.
2. Kalinichenko R., Kotov B., Lukach V., Stepanenko S., Kuzmych A., Gerasymenko V., Hryshchenko V., Kushnirenko A., Borkhalenko Y. (2026). Pattern identification and modeling of energy-efficient operating modes in grain micronization. Journal of Engineering Sciences (Ukraine), Vol. 13(1), pp. G20–G31. https://doi.org/10.21272/jes.2026.13(1).g3

УДК 681.518:004.94

СИМУЛЯЦІЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ПРОМИСЛОВИХ ІОТ-ПРИСТРОЇВ ДЛЯ АНАЛІЗУ РЕЖИМІВ РОБОТИ ОБЛАДНАННЯ

Мурований В.В., магістр; Лебеденко Ю. О., к.т.н., доцент
Київський національний університет технологій та дизайну,
м. Київ, Україна

Підвищення енергоефективності промислових підприємств потребує своєчасного отримання та аналізу даних про роботу обладнання. Одним зі способів збирання таких даних є застосування технологій промислового Інтернету речей (IoT) [1, 2]. Водночас розроблення програмних засобів

моніторингу можуть ускладнюватися обмеженим доступом до реального обладнання й історичних вимірювань. У таких умовах доцільно використовувати синтетичні дані, сформовані симулятором.

Метою роботи є розроблення програмного симулятора енергоспоживання промислових IoT-пристроїв для формування телеметричних даних та порівняння режимів роботи обладнання.

Розроблений симулятор моделює роботу віртуальних пристроїв, для кожного з яких формуються часові ряди показників потужності та спожитої електроенергії. Симуляція охоплює три сценарії: нормальний режим, пікове навантаження та аномальний режим. Параметри пристроїв і моделювання задаються в конфігураційному файлі, що дозволяє змінювати умови експерименту. Для повторюваності експериментів передбачено фіксацію початкового значення генератора випадкових чисел. Сформовані дані можуть експортуватися у формат CSV, а також передаватися через програмний інтерфейс для зберігання й подальшого перегляду. Це дає змогу використовувати їх під час розроблення та перевірки компонентів системи.

Порівняння сценаріїв дає можливість дослідити зміну показників енергоспоживання за різних умов роботи віртуального обладнання. Зокрема, піковий сценарій може застосовуватися для перевірки оброблення підвищених навантажень, а аномальний – для дослідження реакції системи на відхилення в телеметрії.

Таким чином, пропонований симулятор є інструментом для формування відтворюваних наборів даних і попередньої перевірки програмних засобів моніторингу енергоспоживання. Подальша робота передбачає порівняння моделі з фактичними даними та уточнення параметрів симуляції.

Перелік джерел посилань

1. OECD. Measuring the Internet of Things. Paris: OECD Publishing, 2023. URL: https://doi.org/10.1787/021333b7-en.

2. Peng C., Peng T., Liu Y., Geissdoerfer M., Evans S., Tang R. Industrial Internet of Things enabled supply-side energy modelling for refined energy management in aluminium extrusions manufacturing. Journal of Cleaner Production. 2021. Vol. 301. 126882. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126882.

УДК 537.212:667.634

ВПЛИВ ГЕОМЕТРІЇ РОБОЧОЇ ЗОНИ НА ЕЛЕКТРИЧНЕ ПОЛЕ ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПОРОШКОВОГО ФАРБУВАННЯ

Науменко В. С., аспірант;Червінський Л. С., д.т.н., професор

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

Електростатичне порошкове фарбування є електротехнологічним процесом, у якому перенесення заряджених частинок до заземленого виробу залежить від просторового розподілу електричного поля. Геометрія робочої зони, наявність екранувальних елементів і взаємне розташування розпилювача та деталі змінюють умови осадження порошку. Тому однакові параметри

високовольтного джерела не завжди забезпечують однакову рівномірність покриття. Чисельне моделювання електростатичного напилення дає змогу досліджувати перенесення частинок і формування шару з урахуванням просторових умов процесу [1].

Мета роботи полягає у встановленні впливу геометрії робочої зони на неоднорідність електричного поля, ефективність осадження порошку та рівномірність товщини покриття для обґрунтування конструктивних рішень електротехнологічної установки.

Дослідження поєднувало стендовий експеримент і тривимірне електростатичне моделювання в ANSYS Maxwell 2024 R2. Порівнювали чотири конфігурації: прямокутну розміром 600 × 600 × 900 мм; циліндричну діаметром 700 мм і висотою 900 мм; комбіновану з локальними екранувальними елементами; зі змінною міжелектродною відстанню 180–260 мм. Використано 48 сталевих панелей розміром 150 × 100 × 1 мм, по 12 для кожної конфігурації, та поліефірну порошкову фарбу Interpon 610.

Напилення виконували за напруги на електроді 80 кВ, струму до 80 мкА, витрати порошку 110 г/хв і тиску транспортного повітря 0,6 бар. Базова відстань між розпилювачем і зразком становила 220 мм. Полімеризацію проводили за температури металу 180 °C з витримкою 15 хв. У моделі розглядали систему «коронний електрод – заряджений факел – заземлений виріб». Неоднорідність поля оцінювали коефіцієнтом варіації напруженості як відношенням стандартного відхилення до середнього значення. Аналогічно визначали коефіцієнт варіації товщини покриття.

Товщину сухої плівки вимірювали у дев’яти контрольних точках кожного зразка, розміщених у центральній, крайовій і геометрично затіненій зонах, з урахуванням ISO 2808:2019 [2]. Ефективність осадження визначали як відношення маси порошку, осадженого на виробі, до маси порошку, поданого до розпилювача, відповідно до ISO 8130-10:2021 [3]. Такий підхід давав змогу зіставляти електростатичні показники з фактичною просторовою нерівномірністю сформованого шару.

Найменшу неоднорідність поля встановлено для циліндричної конфігурації: коефіцієнт варіації напруженості становив 0,178 за її середнього значення 23,1 кВ/м. Для прямокутної конфігурації цей коефіцієнт дорівнював 0,261, комбінованої – 0,311, зі змінною міжелектродною відстанню – 0,330. Водночас у комбінованій конфігурації середня напруженість була найвищою – 24,4 кВ/м. Отже, підвищення середньої напруженості саме по собі не забезпечувало вирівнювання електричного поля.

Циліндрична конфігурація забезпечила найвищу ефективність осадження порошку – 74,9 %, середню товщину покриття 77,5 мкм і найменший коефіцієнт варіації товщини – 0,093. Для прямокутної конфігурації відповідні показники становили 68,4 %, 74,8 мкм і 0,146; для комбінованої – 63,1 %, 73,6 мкм і 0,201; для конфігурації зі змінною відстанню – 60,7 %, 71,9 мкм і 0,229. Порівняно з прямокутною робочою зоною циліндрична підвищувала ефективність осадження на 6,5 відсоткового пункта.

Різниця товщини між центральною та геометрично затіненою зонами для циліндричної конфігурації становила 3,9 мкм, а для конфігурації зі змінною відстанню – 24,8 мкм. Це свідчить про зв’язок просторової неоднорідності поля з нерівномірністю осадження. Наведений у дослідженні кореляційний аналіз також показав позитивний зв’язок між коефіцієнтами варіації напруженості поля та товщини покриття (r = 0,84).

Таким чином, геометрію робочої зони доцільно враховувати як конструктивний чинник керування електростатичним впливом на порошкові частинки. Серед досліджених варіантів циліндрична конфігурація забезпечила найкраще поєднання ефективності осадження та рівномірності покриття. Результати можуть бути використані під час проєктування камер напилення, вибору розташування розпилювача і заземлених елементів. Отриманий висновок стосується досліджених плоских зразків і режиму напилення; його поширення на складнопрофільні вироби потребує додаткової перевірки.

Перелік джерел посилань

1. Gimenez J. M. Multiscale simulation of electrostatic powder coating sprays. Computational Particle Mechanics. 2024. Vol. 11. P. 1441–1461. DOI: 10.1007/s40571-023-00703-w.
2. ISO 2808:2019. Paints and varnishes – Determination of film thickness. 2019.
3. ISO 8130-10:2021. Coating powders – Part 10: Determination of deposition efficiency. 2021.

УДК 621.317.785:658.26

ОБҐРУНТУВАННЯ СКЛАДУ ТЕХНІЧНОГО ОБЛІКУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ПРОМИСЛОВОГО ПІДПРИЄМСТВА ЗА КРИТЕРІЄМ ЦІННОСТІ ІНФОРМАЦІЇ

Петрова К. Г., к.т.н., доцент; Щєпін В. В., здобувач вищої освіти
Центральноукраїнський національний технічний університет,
м. Кропивницький, Україна.

Ключовим питанням проєктування системи моніторингу енергоспоживання є кількість і розміщення точок технічного обліку. Стандарт ISO 50001 вимагає плану збирання енергетичних даних [1], але не визначає, де потрібні лічильники. На практиці їх обирають за часткою споживання вузла або експертно, хоча його вигода полягає у швидшому виявленні відхилень.

Метою роботи є розроблення методики обґрунтування складу точок технічного обліку електроенергії з урахуванням цінності інформації, яку вони дають для контролю енергоспоживання.

Лічильник не зменшує споживання безпосередньо: його цінність у розумінні теорії цінності інформації [2] полягає у скороченні тривалості відхилень і, отже, перевитрат. Для кожного вузла i задаються середня кількість відхилень за рік λ_i і їхня типова величина $\Delta_i = m_i \bar{E}_i$, де m_i – частка середньодобового споживання $\bar{E}_i$. Відхилення виявляються картами CUSUM за стандартизованими залишками базових ліній вузлів з підобліком (множина S) і залишкової частини, що охоплює решту вузлів [3, 4]. Тому зсув, який має виявити карта, залежить від складу підобліку:

$$\delta_i(S) = \Delta_i/\sigma_i \text{ за підобліку вузла;} \quad \delta_i(S) = \Delta_i/\sigma_R(S) \text{ без нього,} \qquad (1)$$

де σ_i, $\sigma_R(S)$ – розсіяння залишків моделей вузла і залишкової частини. Середню затримку виявлення $D_i(S)$ визначають за характеристикою ARL_1 карти CUSUM з поправкою $\sqrt{((1-\rho)/(1+\rho))}$ на вибілювання автокорельованих залишків. Наприклад, відхилення споживання компресорної станції на 10 % з підобліком виявляється в середньому за 13 діб, а лише за даними АСКОЕ – за 68 діб. Очікувана річна перевитрата енергії

$$\Delta E(S) = \Sigma_i \lambda_i \Delta_i [\min(D_i(S), T_0) + \tau_y], \qquad (2)$$

де T_0 – тривалість невиявленого відхилення (120 діб); τ_y – тривалість його усунення (7 діб). Оптимальний склад S^* мінімізує сумарні річні витрати

$$Z(S) = c_e \Delta E(S) + \text{CRF} \cdot K(S) + B_0 + b|S| + c_x(|S| + 1) \cdot 365/ARL_0 \to \min, \qquad (3)$$

де c_e – ціна електроенергії; $K(S)$ – капітальні витрати; CRF – коефіцієнт повернення капіталу; B_0, b – експлуатаційні витрати; останній доданок – витрати на обстеження за хибними тривогами. Оскільки підоблік вузла зменшує $\sigma_R(S)$, цінність кожної точки залежить від складу інших.

Таблиця 1 – Результати вибору точок підобліку

Вузол	**Частка, %**	**K_i, тис. грн**	**D_i без підобліку, діб**	**D_i за складу S^*, діб**	**У складі S^***
Термопластавтомати	26,3	46	45	21	так
Екструзія	27,0	46	43	12	так
Сушіння, дроблення	8,7	38	79	11	так
Холодильні машини	7,1	72	63	9	так
Компресорна станція	10,6	38	36	8	так
Вентиляція	6,3	92	77	7*	ні
Освітлення	7,9	118	102	9*	ні
Адмінкорпус	4,5	64	> 120	23	так

* – виявлення картою залишкової частини.

Результати застосування методики до моделі підприємства з виробництва полімерних виробів (11 ГВт·год на рік, вісім вузлів) наведено в таблиці 1. Повний перебір 256 варіантів і жадібний алгоритм дали однаковий склад із шести вузлів. Адмінкорпус, частка якого найменша, включено другим після термопластавтоматів: споживання ремонтної майстерні є найбільшим джерелом шуму залишкової частини, і його вилучення підвищує чутливість контролю решти вузлів. Відхилення вентиляції та освітлення виявляються картою залишкової частини за 7–9 діб, тому лічильники вартістю 92 і 118 тис. грн для них не окуповуються. Вибір за часткою споживання дав би протилежне рішення щодо цих трьох вузлів.

Очікувана річна перевитрата від відхилень становить 387 МВт·год без системи моніторингу, 207 МВт·год за контролю лише за даними АСКОЕ і 60 МВт·год за оптимального складу підобліку. Підоблік шести вузлів відносно системи на основі АСКОЕ потребує 304 тис. грн капітальних витрат і має чисту приведену вартість 8,0 млн грн. Склади з 5–7 точками відрізняються від оптимального за сумарними витратами не більше ніж на 2,5 %, а рішення зберігається за вчетверо меншої частоти відхилень. Імітаційне моделювання звітного року підтвердило вибір: підоблік усіх восьми вузлів не зменшив перевитрату, але збільшив кількість хибних тривог з 5 до 8 на рік.

Отже, критерій мінімуму сумарних витрат, що враховує цінність інформації і взаємний вплив точок обліку, дає змогу обґрунтувати склад технічного обліку ще на етапі проєктування, тоді як вибір лише за часткою споживання може призводити як до зайвих, так і до відсутніх лічильників. Методику реалізовано програмно мовою Python.

Перелік джерел посилань

1. ISO 50001:2018. Energy management systems – Requirements with guidance for use. Geneva : ISO, 2018.
2. Howard R. A. Information value theory. IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics. 1966. Vol. 2, № 1. P. 22–26.
3. Hawkins D. M., Olwell D. H. Cumulative Sum Charts and Charting for Quality Improvement. New York : Springer, 1998.
4. Петрова К., Бондаренко В. Оцінювання енергетичної ефективності молокопереробного підприємства методом CUSUM з урахуванням виробничих та кліматичних факторів. Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. 2025. Вип. 3 (152). С. 281–288. DOI: https://doi.org/10.32782/1995-0519.2025.3.31.

УДК 621.316.57:621.311.4

ЦИФРОВИЙ МОНІТОРИНГ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ВАКУУМНИХ ВИМИКАЧІВ У РОЗПОДІЛЬЧИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ 6-35 кВ

Семенов А. О., канд. фіз.-мат. наук, доцент; Радченко О. І., здобувач вищої освіти СВО «Бакалавр»

Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, Україна

Підвищення надійності електропостачання промислових та агропромислових підприємств потребує модернізації комутаційного обладнання розподільчих мереж 6–35 кВ. Перехід до цифрових підстанцій передбачає не лише застосування сучасних вакуумних вимикачів, а й інтеграцію засобів безперервного контролю їхнього технічного стану, діагностики та дистанційного керування. Особливого значення набуває своєчасне виявлення змін комутаційних і механічних характеристик, що дає змогу планувати технічне обслуговування за фактичним станом обладнання [1, 2].

Метою роботи є узагальнення технічних підходів до побудови інтегрованої системи «вакуумний вимикач – цифровий контроль – диспетчерське керування» для розподільчих електричних мереж 6–35 кВ. Використано аналітичне

порівняння комутаційних апаратів, узагальнення електрофізичних особливостей вакуумного дугогасіння та структурно-функціональний аналіз засобів моніторингу.

Узагальнення технічних характеристик показало, що вакуумні вимикачі мають переваги перед масляними та повітряними апаратами за компактністю, пожежною безпекою та потребою в експлуатаційному обслуговуванні. Відсутність елегазу SF_6 як дугогасильного середовища зменшує пов'язані з ним екологічні ризики. Під час розмикання контактів у вакуумній камері утворюється дуга з парів металу, яка згасає поблизу природного переходу струму через нуль, після чого відновлюється електрична міцність міжконтактного проміжку. На комутаційну стійкість впливають матеріал контактів, зокрема CuCr, і стан вакуумної камери [1, 3].

Запропонована функціональна структура системи охоплює три взаємопов'язані рівні: первинний – вакуумний вимикач і датчики струму, напруги, температури, положення контактів та параметрів приводу; локальний – мікропроцесорний контролер збору й аналізу даних із функціями реєстрації подій, виявлення відхилень і оцінювання зношування; диспетчерський – SCADA/АСКТП із візуалізацією стану, архівуванням і дистанційним керуванням. Передавання даних та інтеграція інтелектуальних електронних пристроїв можуть здійснюватися відповідно до стандартів серії IEC 61850 [4].

Для оцінювання технічного стану доцільно використовувати сукупність діагностичних ознак: кількість комутацій, накопичене комутаційне навантаження, час спрацювання приводу, розбіжність моментів перемикання полюсів, температуру контактних з'єднань і стан оперативних кіл. Порівняння поточних значень з допустимими та трендовий аналіз забезпечують формування попереджень про можливі відмови. При цьому діагностичні функції не замінюють штатний релейний захист та протиаварійну автоматику.

Практична цінність інтегрованого підходу полягає у можливості перейти від виключно регламентного обслуговування до обґрунтованого планування ремонтних операцій, оперативніше локалізувати несправності та забезпечувати інформаційну підтримку експлуатаційного персоналу. Для агропромислових об'єктів із технологічно чутливими споживачами це створює передумови для скорочення простоїв і підвищення безперервності електропостачання.

Таким чином, поєднання вакуумних вимикачів із цифровими засобами моніторингу, діагностики та SCADA є перспективним напрямом модернізації розподільчих мереж 6–35 кВ. Подальші дослідження доцільно спрямувати на експериментальну перевірку діагностичних критеріїв, алгоритмів оцінювання залишкового ресурсу та ефективності інтеграції з інформаційною інфраструктурою цифрових підстанцій.

Перелік джерел посилань

1. Razi-Kazemi A. A., Fallah M. R. Investigation of aging procedure of vacuum circuit breakers: hybrid real-time assessment of erosion and pressure in VCB. Engineering Failure Analysis. 2021. Vol. 123. Art. 116685.

2. Semenov A. O., Bychkov Y. M., Kharak R. M. Digital integration of vacuum switching devices in electrical power network systems. International Independent Scientific Journal. 2026. Vol. 81. P. 11–16. DOI: 10.5281/zenodo.18195837.
3. Семенов А. О., Арендаренко В. М., Харак Р. М., Вовк В. О. Сучасний стан інтеграції вакуумних вимикачів і систем контролю в електричних мережах середньої та високої напруги. Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. 2026. № 1 (12). С. 118–124. DOI: 10.20998/EREE.2026.1(12).359791
4. IEC 61850-3:2019. Communication networks and systems for power utility automation – Part 3: General requirements. International Electrotechnical Commission, 2019.

UDC 631.24.243

ECONOMIC ASPECTS OF ELECTRICITY USE IN LUXEMBOURG HOUSEHOLDS

Taisia Mykolaievska, Student
Luxembourg School of Business, Luxembourg

Annual forest fires, floods, and other natural disasters are among the consequences of the greenhouse effect, which is intensified by substantial carbon dioxide emissions from industrial facilities and thermal power plants. Hydrocarbon resources that took nature millions of years to form are being consumed by humanity at an extraordinary rate. Decarbonizing the atmosphere and expanding the use of renewable energy are global challenges that require collective action. Individuals can already contribute to a cleaner environment through their energy choices.

Luxembourg has relatively few domestic power plants and therefore imports approximately 80–85% of the electricity it requires. Under its National Energy and Climate Plan, the country aims to reduce greenhouse gas emissions by 55% by 2030 and achieve net-zero emissions by 2050 [1]. A strategic priority is to shift toward electric technologies powered by renewable energy sources. Heat pumps are becoming the predominant solution for heating new buildings. National building regulations require newly constructed homes to meet energy-efficiency class A+ or A. The installation of oil-fired heating systems in new buildings is prohibited, while the use of gas is strictly limited.

Heating in new homes is provided by heat pumps, with air-to-water and ground-to-water systems being the most common. Because heat pumps operate most efficiently at relatively low temperatures, they are often combined with hydronic underfloor heating, which distributes heat evenly while minimizing energy consumption. These systems do, however, involve substantial upfront investment. For new residential construction, banks offer favorable loans at an annual interest rate of 3%. For young families with modest incomes, the government covers 20% of the loan principal.

I examined electricity consumption in households with two electric vehicles, each driven approximately 20,000 kilometers per year on average. A household of four or five people consumes about 1,300 kWh of electricity for its needs. Figure 1 shows the breakdown of this consumption. Electric vehicles, heat pumps, and washing machines and tumble dryers account for the largest shares of electricity use. The resulting costs are relatively manageable because special nighttime and weekend tariffs can reduce electricity bills by 30–40%. Compared with other European countries,

electricity prices in Luxembourg are relatively low, at approximately €0.15–€0.17 per kWh [3]. On average, these households spend around €270 per month on electricity, an amount representing no more than 5% of the combined minimum income of two working household members.

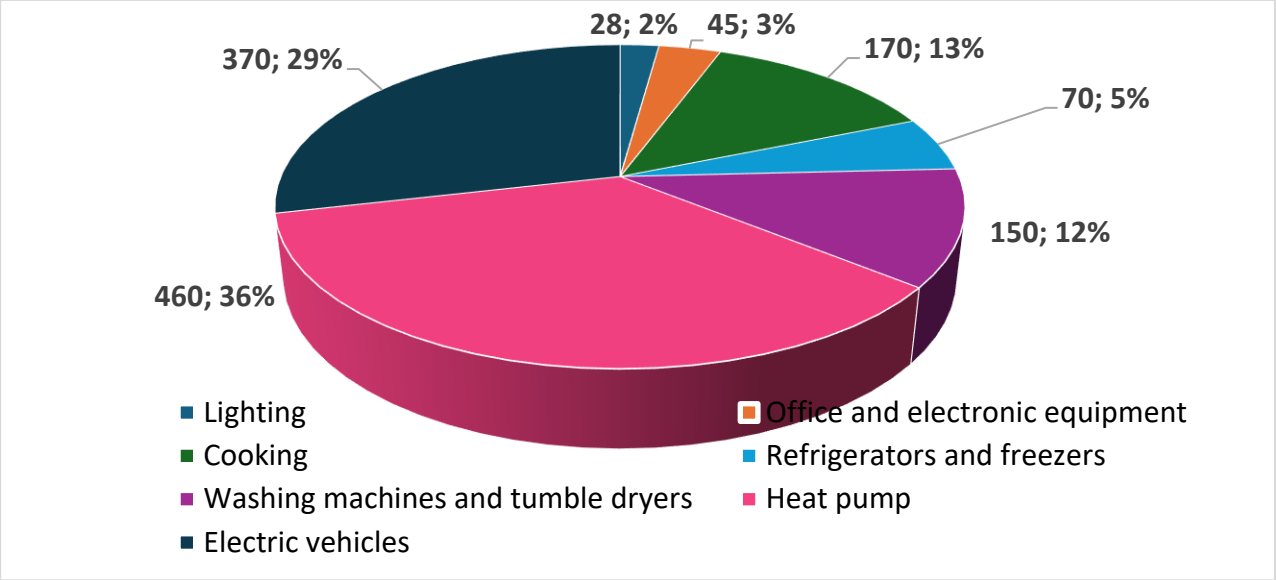


Figure 1. Household electricity consumption, kWh

Nearly all newly built homes are equipped with rooftop solar photovoltaic systems with a capacity of approximately 12 kW. Such a system can generate up to 12,000–13,000 kWh of electricity per year. As a result, a home may produce more electricity than it consumes over the course of a year, achieving a positive annual energy balance. Although solar power cannot meet all electricity needs at every moment, it can reduce electricity costs by a further 40–50%.

Conclusions. The experience of Luxembourg households demonstrates how modern electricity-based technologies can transform everyday living. Through energy-efficient building standards, substantial government subsidies, and the adoption of smart technologies, the country is progressively replacing fossil fuels with cleaner electricity. This approach offers a potential model for a more sustainable and energy-efficient future across the European Union. Continued political commitment, effective government policies, and broad public support will be essential to further decarbonization and a cleaner environment.

References

1. Luxembourg climate action strategy. https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2025/769560/EPRS_BRI(2025)769560_EN.pdf

2. The statistics portal. The Government of the Grand duchy of Luxembourg. https://statistiques.public.lu/fr.html.

3. LUSTAT Data Explorer • Energy price in residential heating sector. https://lustat.statec.lu

UDC 556;581.526.325

ANELASTIC and ELASTIC STRAINS-DEFORMATIONS in SiO_2, CONCRETES, NANOCOMPOSITES of MULTIWALLED CARBON NANOTUBES and POLYMERS, SCIENTIFIC and TECHNICAL PRINCIPLES of ENSURING the SUSTAINABILITY of LAND RECLAMATION HYDROTECHNICAL STRUCTURES in the CONDITIONS of CLIMATIC and ANTHROPOGENIC CHALLENGES

Il'in P. P.[1], Ph.D., Assistant Professor; Onanko Y. A.[2], Ph.D., Senior Researcher; Yatsiuk M. V.[2], Sc.D., Professor; Onanko A. P.[3], Ph.D., Senior Researcher; Voropai G. V.[2], Sc.D., Professor; Kuzmych S. A.[2], Postgraduate; Dmytrenko O. P.[3], Sc.D., Professor; Naumenko A. P.[3], Ph.D., Senior Researcher; Matzui L.Y.[3], Sc.D., Professor; Pinchuk-Rugal T. M.[3], Ph.D; Rugal A. G.[3], Engineer; Pavlenko O. L.[3], Sc.D., Professor; Bondarchuk T. V.[3], Postgraduate; Popov S. A.[3], Ph.D., Head of laboratory; Kurochka L. I.[3], Head of laboratory

[1]National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

[2]Institute of Water Problems and Land Reclamation NAASU, Kyiv, Ukraine

[3]Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

Introduction

The development is implemented on a personal computer by installing special software "VELOCITY". The computerized ultrasonic (US) propagation velocity meter "VELOCITY" is designed to measure the longitudinal $V_{\parallel}$ and transverse $V_{\perp}$ velocities of US propagation by measuring the delay time Δt of the wave front as it passes through the sample SiO_2, concrete, nanocomposite.

Experimental methods

US pulse-phase method for determining of the elastic waves velocities $V_{\parallel}$, $V_{\perp}$ using USMV-LETI, modernized USMV-KNU and computerized "VELOCITY" with frequencies $f_{\parallel} \approx 1$ MHz and $f_{\perp} \approx 0{,}7$ MHz were used [1,2]. The samples were prepared by ultrasonic dispersion using digital US bath CE-6200A with power W = 70 watt frequency $f \approx 42$ kHz. The main window of the "VELOCITY" program is shown in Fig. 1.

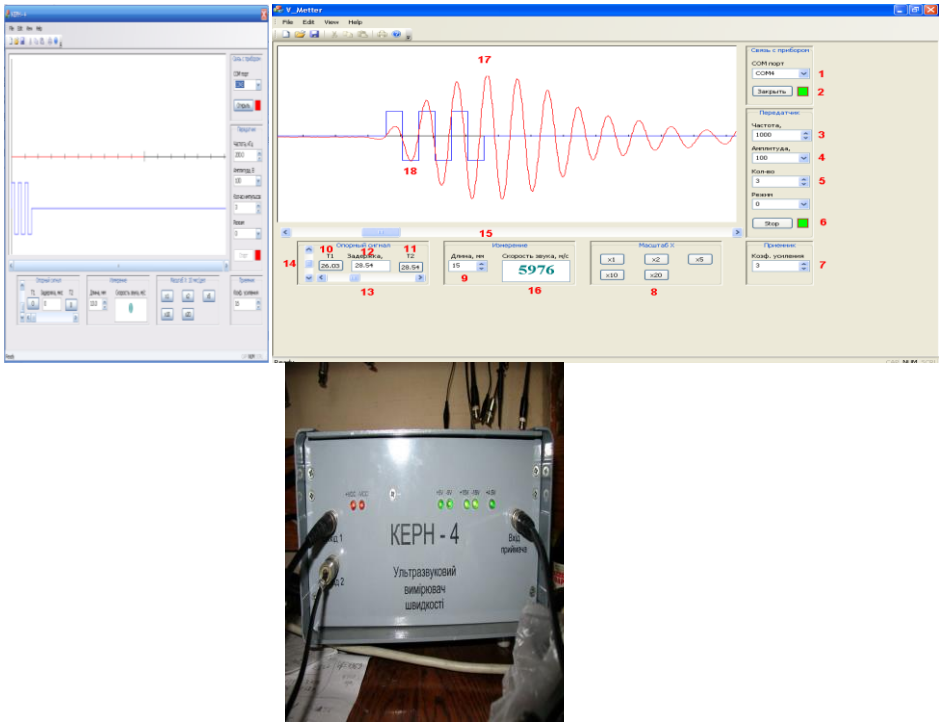


Fig. 1. Illustration of the window for processing data for measurements of longitudinal $V_{\parallel}$ and transverse $V_{\perp}$ velocities of elastic waves using the pulsed-phase ultrasonic technique at frequencies $f_{\parallel} \approx 1.11$ MHz and $f_{\perp} \approx 0.43$ MHz and a general view of the device "VELOCITY".

Results and discussion

Anelastic and elastic strains-deformations in SiO_2, concretes, radiation and structural functionalized nanocomposites of multiwalled carbon nanotubes (MWCNTs) and polymers: polyamide-6 $(NH(CH_2)_5CO)_n$, polyvinylchloride $(C_2H_3Cl)_n$, polyethylene $(C_2H_4)_n$, fluoroplastic F-3M were researched. The oscilloscopegramma of impulses with quasitransversal, quasilongitudinal polarization, which are reflected in SiO_2+Si with the sweep time t = 1 μsec are represented in Fig. 2.

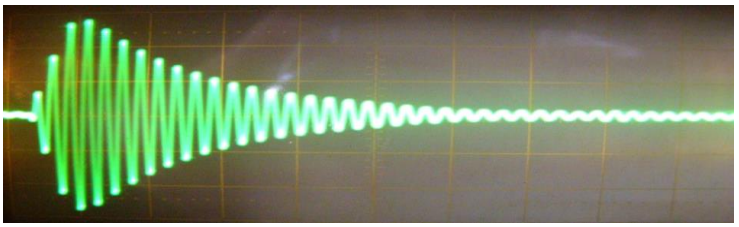


Fig. 2. Oscilloscopegramma of impulses with quasilongitudinal polarization, which are reflected in SiO_2+Si with the sweep time t = 1 μsec.

The oscilloscopegramma of impulses with quasilongitudinal polarization, which are reflected in Si+TiO_2 with the sweep time t = 1 μsec is represented in Fig. 3.

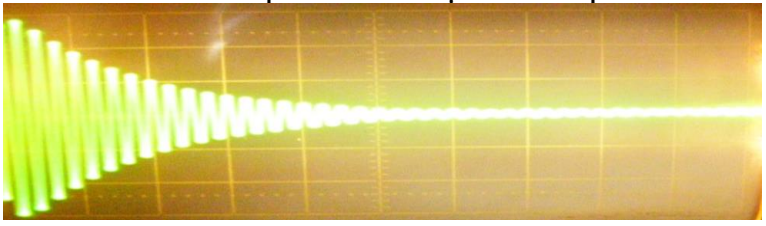


Fig. 3. Oscilloscopegramma of impulses with quasilongitudinal polarization, which are reflected in Si+TiO_2 with the sweep time t = 1 μsec.

Conclusions

1. Dynamic deformations in hydromeliorative systems depends on formation and propagation of cracks, restoration of mechanical stress fields (compression-tension) after explosions of shells and drones.

Acknowledgements

This work has been supported by Ministry of Education and Science of Ukraine: Grant of the Ministry of Education and Science of Ukraine for perspective development of a scientific direction "Mathematical sciences and natural sciences" at Taras Shevchenko National University of Kyiv.

References

1.Onanko Y. A., Kuzmych L. V., Onanko A. P. et al. Influence of annealing on indicatory surface of anelastic-elastic body of GeSi. (Q1)Discover Applied Sciences. 2025. V. 7, № 10. P. 1210(9). DOI: https://doi.org/10.1007/s42452-025-07799-0

2. Onanko Y. A., Kuzmych L. V., Onanko A. P. et al. Influence of irradiation on indicatory surface of anelastic-elastic body of AgZn alloy. (Q2)Materials Research Express. 2025; 12(1): 016516(8). DOI: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2053-1591/adabbc

УДК 621.313:004.94

ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ З РЕГУЛЬОВАНИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ДЛЯ ПОБУДОВИ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА

Васюк В.В., к.т.н., доцент; Коробський В.В., к.т.н., доцент

[1]Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна.

Ефективність застосування цифрового двійника електромеханічного комплексу значною мірою визначається точністю параметрів його математичної моделі. Параметри електричної машини та механічної частини не залишаються незмінними протягом експлуатації: активні опори залежать від температури, електромагнітні параметри – від режиму навантаження та насичення, а механічні характеристики можуть змінюватися внаслідок зношування і зміни технологічного навантаження. Тому цифрова модель, сформована лише за паспортними даними, з часом може втрачати відповідність фізичному об’єкту. Однією з ключових умов функціонування повноцінного цифрового двійника є періодична або безперервна ідентифікація його параметрів за вимірюваними сигналами [1–3].

Метою роботи є обґрунтування принципів ідентифікації параметрів електромеханічного комплексу з регульованим електроприводом для формування та актуалізації його цифрового двійника. Як початковий експериментальний об’єкт доцільно розглядати частотно-регульований електропривод з асинхронною машиною, що містить силовий перетворювач, електродвигун, механічне навантаження, систему керування та вимірювальні засоби. Вектор параметрів цифрової моделі можна подати у вигляді

$$\theta = [R_S, R_r, L_S, L_r, L_m, J, B, T_L]^T,$$

де R_S, R_r – активні опори статора та ротора; L_S, L_r, L_m – індуктивні параметри електричної машини; J – приведений момент інерції; B – коефіцієнт механічних втрат; T_L – момент навантаження.

Вихідний вектор фізичного електромеханічного комплексу може містити вимірювані фазні струми, напруги, частоту обертання, температуру та інші доступні величини:

$$yF(k) = [is(k), us(k), \omega(k), T(k), \dots]^T.$$

Відповідний вектор цифрової моделі визначається як $yDT(k, \theta)$. Для ідентифікації параметрів пропонується мінімізувати невідповідність між вимірюваними та розрахунковими сигналами:

$$J(\theta) = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}[y_F(k) - y_{DT}(k,\theta)]^T W[y_F(k) - y_{DT}(k,\theta)] \to \min_{\theta}.$$

де N – кількість відліків; W – вагова матриця, що дає змогу враховувати різну інформативність і масштаб вимірюваних величин.

Тоді оцінений вектор параметрів визначається як

$$\hat{\theta}=\arg\min_{\theta} J(\theta).$$

У сучасних дослідженнях для цього застосовуються оптимізаційні алгоритми, фільтри стану та комбіновані фізико-інформаційні методи [2–4].

Важливою умовою достовірної ідентифікації є визначення параметрів, зміна яких реально проявляється у доступних вихідних сигналах. Для цього може використовуватися нормована функція чутливості

$$S_{ij} = \frac{\theta_j}{y_i}\frac{\partial y_i}{\partial \theta_j},$$

де S_{ij} характеризує вплив зміни *j*-го параметра моделі на *i*-ту вимірювану величину. Високе абсолютне значення S_{ij} свідчить про достатню інформативність відповідного сигналу для оцінювання параметра. Аналіз чутливості дає змогу сформувати скорочений вектор параметрів, які доцільно оновлювати в поточному режимі роботи. Розроблення процедури параметричної ідентифікації має також безпосереднє значення для задач технічного діагностування. Якщо після адаптації параметрів цифрової моделі нев'язка між цифровим і фізичним об'єктом залишається стійкою або має характерні часові чи спектральні складові, це може розглядатися як додаткова ознака зміни технічного стану обладнання. Практичну перевірку запропонованого підходу доцільно виконувати на лабораторному комплексі «перетворювач частоти – асинхронний двигун – регульоване механічне навантаження» з реєстрацією струмів, напруг, частоти обертання та температури. Таким чином, параметрична ідентифікація є необхідною складовою побудови адаптивного цифрового двійника електромеханічного комплексу. Запропонований підхід передбачає поєднання аналізу чутливості, мінімізації невідповідності між фізичним об'єктом і цифровою моделлю та періодичного оновлення параметрів. Подальші дослідження доцільно спрямувати на вибір найбільш інформативних сигналів, розроблення алгоритмів онлайн-ідентифікації та експериментальну перевірку їх точності за різних режимів роботи електропривода.

Перелік джерел посилань
1. Dhamo D., Spahiu A., Panxhi D. Digital Twins in Electric Drives: A Review and Proposed Framework. *Power Electronics and Drives*. 2026. Vol. 11(46), No. 1. P. 299–315. DOI: 10.2478/pead-2026-0021.
2. Frikha M.A., El Baghdadi M., Hegazy O. Hybrid Physics–Data-Driven Digital Twin of a Six-Phase PMSM with Experimentally Identified Parameters and Saturation Maps. *Energies*. 2026. Vol. 19, No. 21. Art. 5286. DOI: 10.3390/en19215286.
3. Udomsuk S., Areerak K., Areerak T., Areerak K. Online Estimation of Three-Phase Induction Motor Parameters Using an Extended Kalman Filter for Energy Saving. *Energies*. 2024. Vol. 17, No. 9. Art. 2115. DOI: 10.3390/en17092115.
4. Knežević I., Ćalasan M., Dlabač T., Filipović F., Mitrović N. A New Approach for Parameter Estimation of Induction Machines Based on Speed-Time Characteristics During Direct Startup. *Measurement*. 2026. Vol. 274. Art. 121255. DOI: 10.1016/j.measurement.2026.121255.
5. Мірських Г.О., Березюк А.О., Васюк В.В., Книжка Т.С. Параметричний синтез об'єкта електроенергетики як завдання пошукової оптимізації. *Енергетика і автоматика*. 2022. № 4. С. 131–143. DOI: 10.31548/energiya2022.04.131.

УДК 621.313:004.94

СТРУКТУРНО-ФУНКЦІОНАЛЬНІ ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ З РЕГУЛЬОВАНИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ

Васюк В.В., к.т.н., доцент; Коробський В.В., к.т.н., доцент
Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна.

Сучасні електромеханічні комплекси з регульованим електроприводом працюють за змінного навантаження, температурних впливів і поступової зміни параметрів електричних машин та силових перетворювачів. За таких умов стаціонарна математична модель не завжди адекватно відображає фактичний стан об'єкта. Перспективним підходом є технологія цифрових двійників, що поєднує фізичний об'єкт із динамічно оновлюваною цифровою моделлю та дає змогу використовувати її для моніторингу і діагностування технічного стану електропривода [1–3].

Метою роботи є обґрунтування структурно-функціональних принципів побудови цифрового двійника електромеханічного комплексу з регульованим електроприводом для оцінювання технічного стану та подальшої оптимізації режимів роботи. Електромеханічний комплекс доцільно розглядати як взаємопов'язану систему «силовий перетворювач – електрична машина – робочий механізм – система керування – вимірювальні засоби». Такий підхід спирається на методи математичного моделювання електромеханічних перетворювачів і параметричного синтезу електротехнічних об'єктів [4, 5]. Математичну основу цифрового двійника доцільно подати моделлю стану

$$\dot{x}(t) = f\big(x(t), u(t), \theta(t)\big), y_{DT}(t) = h\big(x(t), \theta(t)\big).$$

де x – вектор змінних стану; u – керуючі та зовнішні впливи; θ – вектор параметрів моделі; y_{DT} – розрахункові вихідні величини. На відміну від

звичайної імітаційної моделі цифровий двійник має синхронізуватися з фізичним об’єктом. Для цього визначається вектор нев’язок

$$r(t) = y_F(t) - y_{DT}(t),$$

де $y_F(t)$ – виміряні сигнали фізичного об’єкта. Для кількісної оцінки відповідності моделі даним вимірювань може застосовуватися середньоквадратичний показник

$$E_r = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} ||y_{\mathrm{F}}(k) - y_{\mathrm{DT}}(k)||^2}.$$

Зростання E_r або систематична зміна структури нев’язок може свідчити про зміну параметрів чи технічного стану об’єкта. Сучасні дослідження цифрових двійників електричних машин підтверджують можливість використання залишкових струмових сигналів для онлайн-діагностування пошкоджень обмоток [2, 3]. Ключовою процедурою цифрового двійника є адаптація параметрів моделі за даними реального електропривода:

$$\theta^* = \arg \min_{\theta} \sum_{k=1}^{N} \|y_{\mathrm{F}}(k) - y_{\mathrm{DT}}(k,\theta)\|^2.$$

Вектор θ може включати активні опори та індуктивні параметри обмоток, момент інерції, коефіцієнти механічних втрат, параметри навантаження та теплового стану. Запропонована структура цифрового двійника містить фізичний, інформаційно-вимірювальний, модельний, ідентифікаційний та аналітичний рівні. На аналітичному рівні результати порівняння моделі з реальним об’єктом можуть використовуватися для формування діагностичних ознак і вибору раціонального режиму роботи з урахуванням фактичного стану електропривода. Для діагностування доцільно аналізувати не лише інтегральне значення похибки E_r, а й часові та спектральні характеристики складових $r(t)$. У задачах оптимізації цифровий двійник може використовуватися для попередньої оцінки допустимих режимів за енергетичними втратами, нагріванням і відхиленням технологічних параметрів без безпосереднього впливу на фізичний об’єкт.

На першому етапі практичної реалізації доцільно використати частотно-регульований асинхронний електропривод як доступний експериментальний об’єкт, що включає перетворювач частоти, асинхронний двигун, регульоване механічне навантаження та засоби вимірювання струмів, напруг, швидкості й температури.

Таким чином, запропонований підхід передбачає побудову адаптивного цифрового двійника, параметри якого уточнюються за даними фізичного об’єкта. Подальші дослідження спрямовуватимуться на експериментальну верифікацію цифрової моделі, визначення інформативних діагностичних ознак та розроблення методів оптимізації режимів електромеханічного комплексу з урахуванням його поточного технічного стану.

Перелік джерел посилань

1. Dhamo D., Spahiu A., Panxhi D. Digital Twins in Electric Drives: A Review and Proposed Framework. Power Electronics and Drives. 2026. Vol. 11(46), No. 1. P. 299–315. DOI: 10.2478/pead-2026-0021.
2. Hedayati Kia S., Dunai L., Antonino-Daviu J.A., Razik H. Real-Time Digital Twins for Intelligent Fault Diagnosis and Condition-Based Monitoring of Electrical Machines. Energies. 2025. Vol. 18, No. 17. Art. 4637. DOI: 10.3390/en18174637.
3. Chen Y., Zhao L., Li L., Liu K., Ye C. Digital Twin-Based Online Diagnosis Method for Inter-Turn Short Circuit Fault in Stator Windings of Induction Motors. Energies. 2025. Vol. 18, No. 12. Art. 3063. DOI: 10.3390/en18123063.
4. Кондратенко І.П., Жильцов А.В., Пащин М.О., Васюк В.В. Вибір параметрів електромеханічного перетворювача індукційного типу для електродинамічної обробки зварних з'єднань. Технічна електродинаміка. 2017. № 5. С. 83–88. DOI: 10.15407/techned2017.05.083.
5. Мірських Г.О., Березюк А.О., Васюк В.В., Книжка Т.С. Параметричний синтез об'єкта електроенергетики як завдання пошукової оптимізації. Енергетика і автоматика. 2022. № 4. С. 131–143. DOI: 10.31548/energiya2022.04.131.

УДК 621.318.2:621.3.013

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО РОЗПОДІЛУ НАМАГНІЧЕНОСТІ ПОСТІЙНИХ МАГНІТІВ НА ОСНОВІ ПРИНЦИПУ ВЗАЄМНОСТІ

Жильцов А.В.[1], д.т.н., професор, Березюк А.О.[1], к.т.н., доцент, Гай Г.А.[2], к.пед.н., доцент, Усенко С.М.[2], к.т.н., доцент, Поліщук К.С.[2], аспірант.

[1] Інститут електродинаміки НАН України.

[2] Національний університет біоресурсів і природокористування України.

Постійне зростання вимог до енергоефективності та питомої потужності електромеханічних систем зумовлює широке застосування синхронних машин із постійними магнітами. Їхні електромагнітні характеристики значною мірою визначаються просторовим розподілом вектора залишкової намагніченості магнітів, який впливає на величину потокозчеплення, форму електрорушійної сили та рівень гармонічних спотворень магнітного поля. Традиційні способи намагнічування, зокрема радіальна та однорідна (паралельна), характеризуються технологічною простотою, проте не завжди забезпечують максимальне використання магнітного матеріалу. Альтернативою є магнітні системи Halbach, які дають змогу покращити розподіл магнітної індукції, але потребують складнішої технології виготовлення ротора. Відомі методи чисельної оптимізації також мають обмеження, пов'язані зі значними обчислювальними витратами через необхідність багаторазового розв'язування задач методом скінченних елементів.

Перспективним підходом до визначення оптимального розподілу намагніченості є застосування принципу взаємності, який дає змогу синтезувати напрямок вектора залишкової намагніченості на основі розрахованого магнітного поля без використання ітераційної оптимізації.

Метою роботи є розроблення та верифікація методики визначення оптимального просторового розподілу намагніченості постійних магнітів у середовищі COMSOL Multiphysics із використанням принципу взаємності та методу скінченних елементів.

Магнітний потік, створюваний намагніченим тілом через задану поверхню, визначається виразом

$$\Psi = \frac{1}{I}\int_V \vec{B}\vec{M}dV \quad ,$$

де I – струм у контурі, що обмежує поверхню; V – об'єм магніту; $\vec{B}$ – індукція магнітного поля, створеного цим струмом (з урахуванням феромагнетиків);

$\vec{M}$ – намагніченість.

З формули випливає, що за фіксованої геометрії потік буде максимальним, якщо в кожній точці магніту вектор орієнтований уздовж поля . При цьому оптимальна орієнтація не залежить від модуля намагніченості.

Методика базується на принципі взаємності магнітостатичних задач [1-3]. Відповідно до нього оптимальний напрямок вектора залишкової намагніченості $\vec{M}$ у кожній точці області постійних магнітів збігається з напрямком індукції $\vec{B}$ магнітного поля, створеного заданим синусоїдальним розподілом струму на поверхні статора (або в обмотці). Практична реалізація методики в середовищі COMSOL Multiphysics включає такі послідовні кроки:

-створюється тривимірна або двовимірна вісесиметрична / 2D-періодична модель електричної машини;

-на внутрішній поверхні статора (або на поверхні, що відповідає розташуванню обмотки) створюється тонкий шар струму. Лінійна густина струму задається у вигляді $i(\theta)=I_m \sin(p\alpha)$;

-розв'язується стаціонарна магнітостатична задача.

Розрахований розподіл $\vec{B}_{coil}(Q)$ безпосередньо приймається за напрямок оптимального вектора намагніченості:

$$\vec{M}_{opt}(Q)=M_s\frac{\vec{B}_{coil}(Q)}{|B_{coil}(Q)|},$$

де M_s – модуль залишкової намагніченості матеріалу магніту (для $NdFe35$ відповідає B_r).

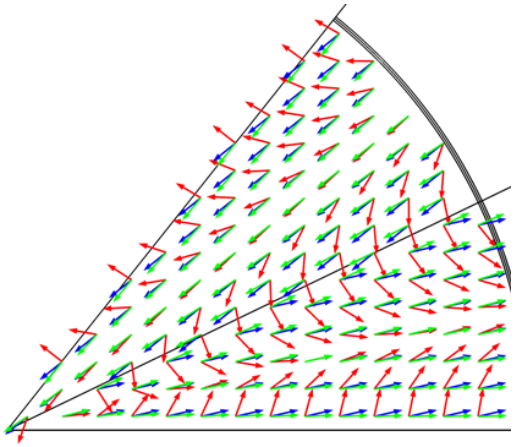


Рис. 1. Розподілів намагніченості в області постійного магніту.

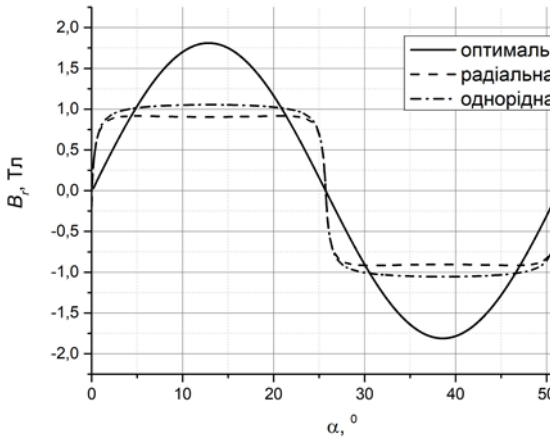


Рис. 2. Розподілів нормальної складової індукції у повітряному проміжку.

Порівняння розподілів намагніченості в області постійного магніту (Рис. 1) показує суттєву відмінність оптимальної намагніченості (за принципом взаємності) від традиційних способів. На рис. 2 наведено порівняння розподілів нормальної складової індукції у повітряному проміжку для трьох способів намагнічування.

Перелік джерел посилань

1. Zhu Z.Q., Howe D. Halbach permanent magnet machines and applications: a review. *IEE Proc. – Electr. Power Appl.*, 2001. Vol. 148, No. 4. pp. 299–308.
2. Жильцов А.В., Сорокин Д.С. Синтез магнітної системи лінійного двигуна з постійними магнітами. Моделювання та інформаційні технології. 2010. Вип. 55. С. 9–16.
3. Özmen T., Onat N. The Effects of Magnetic Circuit Geometry and Material Properties on Surface Mounted Permanent Magnet Synchronous Generator Performance. Balkan Journal of Electrical & Computer Engineering. 2021. Vol. 9, No. 2. pp. 99–105

УДК 829.429. 3:621.313

ДИНАМІКА ВИДОБУВАННЯ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В СТРУКТУРІ ВИРОБНИЦТВА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НІДЕРЛАНДІВ, ЯК КРАЇНИ-ЛІДЕРА СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ ЄС

Дробін О.А., ***студент;*** *Грудинін Б.О.,* ***д-р пед. наук, доцент, завкафедри фізики***

Навчально-науковий інституту енергетики, автоматики і енергозбереження НУБіП України

Мета роботи – розкрити особливості динамічного зростання частки сонячної енергії в структурі виробництва електроенергії Нідерландів, як країни-лідера сонячної енергетики ЄС.

Результати досліджень. На основі даних аналітичного центру Ember висновковано, що у 2024 р. Нідерланди виробляли найвищу частку сонячної енергії у структурі її виробництва електроенергії серед усіх країн ЄС. Нарощуючи темпи розвитку сонячної енергетики, Нідерланди у 2022 році вже виробляли 14% власної електроенергії від Сонця, випередивши Іспанію (лідера ринку ЕС) на 2%.

Запорукою такої позитивної динаміки стало історичне зростання кількості сонячних панелей на дахах житлових будинків у 2022 р., що уможливило отримання додаткових 1,8 ГВт сонячної енергії через панелі на дахах, що на 38% більше, ніж у 2021 році.

Швидке поширення сонячних панелей стало можливим завдяки підтримці Нідерландами житлових проєктів із чистими лічильниками, які реалізуються завдяки функціонуванню енергетичних кооперативів, що суттєво збільшує виробництво енергії від сонця.

Зусилля Нідерландів щодо розвитку вітрової та сонячної енергій вже допомогли знизити залежність країни від викопного палива, оскільки частка вугілля у виробництві електроенергії у Нідерландах впала з 36% у 2015 році до 13% у 2022 році, а з газу – на 17%.

З 2025 р. влада Нідерландів зробила обов’язковим встановлення сонячних

панелей на дахах новобудов (всі новобудови, крім житлових будинків із площею даху понад 250 кв. м.).

Відповідно до досліджень незалежної голландської дослідницької організації TNO, Нідерланди до 2025 р. можуть досягти 180 ГВт встановленої сонячної енергії. Ця оцінка отримана на основі моделі оптимізації енергетичної системи OPERA, яка (модель) перераховує найбільш рентабельну конфігурацію енергосистеми та системи викидів парникових газів за певних обмежень шляхом мінімізації цільової функції, що виражає загальні витрати системи на будь-який майбутній рік.

Інші сценарії (ADAPT і TRANSFORM) передбачають суттєве збільшення виробництва електроенергії з вітрових і сонячних джерел, причому перші забезпечуватимуть близько половини первинного постачання електроенергії до 2050 року. Між тим, слід зазначити, що викопне паливо все ще становить значну частину загального обсягу прямого споживання електроенергії в обох сценаріях енергозабезпечення.

Висновки. Енергія, вироблена за допомогою сонячних панелей, є важливою частиною переходу країни на новий енергетичний устрій, за допомогою якої можна досягти значного скорочення викидів CO2, що є наслідком дотримання Нідерландами Паризької угоди щодо зміни клімату.

Перелік джерел посилань

1. DG Investment Trends Monitor. UNCTAD. URL: https://unctad.org/system/files/official-document/diaemisc2020d3_en.pdf (дата звернення: 14.11.2025).
2. «Зелені» інвестиції у сталому розвитку: світовий досвід та український контекст. Центр Разумкова. Київ, 2019. 316 с.
3. European Electricity Review 2024 URL: https://ember-energy.org/latest-insights/european-electricity-review-2024/ (дата звернення: 20.11.2025).

УДК 313.33:621.318.122

ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ СХЕМИ ЗАМІЩЕННЯ КОМПЕНСОВАНОГО АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Каплун В.В., д.т.н., професор; Чуєнко Р.М., к.т.н., доцент, Макаревич С.С., к.т.н., доцент

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна.

Для одержання розрахункових характеристик режимів функціонування генератора такого класу аналітичним шляхом зазвичай використовують теорію ідеалізованої асинхронної машини з представленням електромеха-нічних процесів перетворення енергії та основних фізичних параметрів у вигляді рівнянь електричної рівноваги і руху привода [1]. Відома узагальнена система диференційних рівнянь дає можливість розрахувати динамічні і статичні процеси для симетричних і несиметричних режимів при заданих параметрах машини. Для практичної реалізації моделювання параметрів асинхронного генератора використані рівняння електричної рівноваги кіл статора і ротора для симетричного усталеного режиму, яка є частковим випадком узагальненої

математичної моделі машини як для перехідних, так і усталених процесів з постійними параметрами схеми заміщення [2]. Урахування особливостей компенсованих асинхронних генераторів можливе на основі використання математичної моделі з поділом обмотки статора на дві співвісні або просторово зміщені між собою частини, що призводить до подвоєння кількості рівнянь електричної рівноваги фаз статора, а ввімкнення обмоток статора за схемою поворотного автотрансформатора на електричну ємність вимагає введення додаткового диференційного рівняння електричної рівноваги фаз статора. Це дало змогу обґрунтувати параметри схеми заміщення компенсованого асинхронного генератора з урахуванням взаємного індуктивного зв'язку між напівобмотками фаз статора як за основним полем, так і за полями розсіяння. При цьому у системі рівнянь електричної рівноваги кіл статора і ротора генератора необхідно врахувати параметри схеми заміщення, розраховані за відомою методикою, та внесені параметри, зокрема ємнісні опори конденсаторів та опір навантаження $Z_н$. Результати розрахунку характеристик компенсованих асинхронних генераторів із достатньою точністю підтверджуються експериментальними дослідженнями.

Перелік джерел посилань

1. Загірняк М. В., Невзлін Б. І. Електричні машини : підручник. 2-ге вид., перероб. і доп. Київ : Знання, 2009. 399 с.
2. Kaplun, V., Chuenko, R., & Makarevych, S. (2022). Investigation of energy parameters of a compensated asynchronous motor in the mode of repeated short-term starts. Machinery & Energetics, 13(3), 25-33.

УДК 313.33:621.318.122

ОСОБЛИВОСТІ ВИГОТОВЛЕННЯ ОБМОТОК СТАТОРА КОМПЕНСОВАНИХ АСИНХРОННИХ ГЕНЕРАТОРІВ

Каплун В.В., д.т.н., професор, Чуєнко Р.М., к.т.н., доцент, Макаревич С.С., к.т.н., доцент
Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна.

Нині все більшої актуальності за умов частих відключень централізованого електропостачання набувають системи резервування, побудованих на базі простих і надійних асинхронних генераторів [1], зокрема, компенсованих [2].

Реалізація внутрішньої ємнісної компенсації реактивної потужності в асинхронних генераторах може бути здійснена двома способами у залежності від прийнятої схеми та кількості паралельних віток обмотки статора базової машини. При цьому враховується, що у відповідності із парною кількістю полюсів обмотку статора завжди можна розділити на дві однакові послідовно або паралельно з'єднані частини, причому такий розподіл може бути виконаний для машини будь-якої потужності та частоти обертання.

Для усіх генераторів, модернізованих із використанням внутрішньої компенсації при послідовному з'єднанні напівобмоток фаз статора, зберігаються переріз, діаметр і марка провода; кількість провідників у пазу, кількість

елементарних провідників у одному ефективному та кількість паралельних віток базової обмотки. Якщо ж до використання обрано паралельне з'єднання напівобмоток фаз статора, то кількість елементарних провідників у одному ефективному залишається незмінними, кількість провідників у пазу збільшується вдвічі, а площа поперечного перерізу проводу вдвічі зменшується. Виготовлення секцій обмоток здійснюється на типовому обладнанні за загальноприйнятими технологіями. Розміри секцій приймаються залежно від габаритів машини, схеми обмотки та величини її кроку. Проте обов'язковою особливістю модернізованої обмотки є її розподіл на дві однакові напівобмотки, що в окремих випадках передбачає певні відхилення від схем базових обмоток. У такому разі одношарова обмотка може бути пошарово поділена на дві напівобмотки, одна з яких розташовується у нижній частині пазів, інша – у верхній (наприклад, при q = непарне число) з просторовим зміщенням напівобмоток одна відносно іншої на обраний кут.

Перелік джерел посилань

3. Яцун М.А. Електричні машини. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2011. 464 с.
4. Мішин В.І. Компенсовані асинхронні машини / [Мішин В.І., Каплун В.В., Чуєнко Р.М. та ін.]. – К.: КНУТД, 2012. – 221 с.

УДК 621.792:537.632:629.73

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЗМУ ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРНОЇ АНІЗОТРОПІЇ В КЛЕЙОВИХ З'ЄДНАННЯХ СТАЛІ ТА АЛЮМІНІЮ ПІД ДІЄЮ МАГНІТНОГО ПОЛЯ

Свирид М. М.[1], к.т.н., доцент; Квач Ю.М.[2], к.т.н., доцент
[1]Національний університет «Київський авіаційний інститут» м. Київ, Україна.
[2]Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна.

В умовах відсутності на вітчизняному ринку клею марки ВК-37 критично актуальним завданням для авіаційної галузі є розробка високоефективних аналогів термостійких клейових композицій для з'єднання деталей зі сталей та алюмінієвого сплаву Д16АТ [1].

Клейові та клейо-різьбові з'єднання мають забезпечувати високу міцність і надійність у широкому інтервалі робочих температур (від – 60 °С до +150 °С) протягом тривалого експлуатаційного ресурсу (понад 1000 годин). Додатковою вимогою до різьбових з'єднань є їхня тривала стійкість до агресивного середовища гідравлічної рідини Skydrol. Це потребує впровадження додаткових електрохімічних параметрів захисту як на межі розділу матеріалів, так і в самій структурній матриці клею [2].

Вирішення цієї проблеми базується на глибокому розумінні фізико-механічних та структурних процесів, що відбуваються у шар-полімері під час

його полімеризації (тужавіння) під дією зовнішніх фізичних полів (зокрема магнітного поля та термообробки).

В роботі досліджується вплив постійного магнітного поля на морфологію поверхонь розриву клейового з'єднання різнорідних металів (алюміній - парамагнетик, залізо - феромагнетик). Специфіка експерименту полягала у двостадійному режимі формування з'єднання:

- витримування під тиском 700 Н у постійному магнітному полі протягом 24 годин при температурі 22-25 ^{0}C;

- термічне запікання без магнітного поля протягом 72 годин при температурі 70 ^{0}C.

Аналіз мікрофотографій поверхні розриву (рис. 1) показав формування впорядкованого регулярного рельєфу з паралельно орієнтованими смугами та мікрократерами. Механізм формування такого рельєфу пояснюється наступним:

1. Асиметрія магнітного поля: феромагнітне залізо концентрує силові лінії магнітного поля, тоді як алюміній є магнітопасивним. Це викликає асиметричне проникнення векторів магнітної індукції крізь клейовий шар та вишиковування дипольних молекул або мікрочастинок клею у напрямку «алюміній — залізо» протягом перших 24 годин.

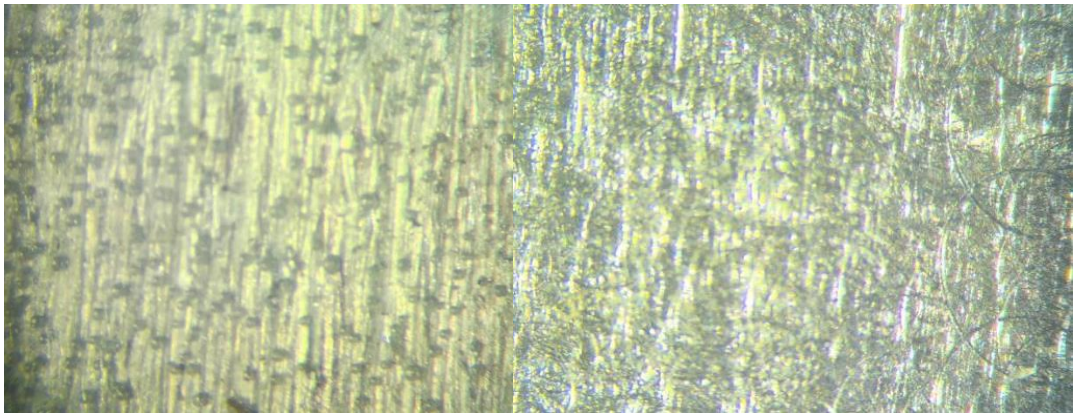


Рис. 1 Мікрофотографії поверхні розриву

2. Первинне структурування: початковий тиск 700 Н мінімізує товщину клейового шару, а магнітне поле фіксує орієнтовану впорядковану анізотропія).

3. Термічна дегазація та «запікання»: при підвищенні температури до 70 °C відбувається прискорення зшивання полімерних ланцюгів та виділення залишкових газів у вигляді мікробульбашок. Бульбашки мігрують і вишиковуються вздовж вже сформованих магнітом орієнтованих каналів, утворюючи регулярні ланцюжки мікропор.

4. Когезійне руйнування:отриманий після термообробки жорсткий клейовий шар руйнується за когезійним механізмом вздовж зон локальних напружень, залишаючи рельєфні ниткуваті виступи та кратери розриву.

Таким чином, на основі наданого матеріалу можна сформулювати висновок для подальших досліджень: накладення постійного магнітного поля на етапі початкової полімеризації викликає керовану структурну анізотропію в клейовому шарі між різнорідними металами (Fe - Al), подальше термічне

«запікання» фіксує цю впорядковану структуру. Утворена анізотропія визначає механізм руйнування матеріалу (когезійний розрив із вишикуваними мікрократерами та нитками), що безпосередньо впливає на міцнісні та експлуатаційні характеристики клейового шва.

Перелік джерел посилань

1. Патент України № 81369. Спосіб оцінки енергоінформаційного стану рідиннофазних вуглецевих матеріалів у магнітному полі / Свирид М. М. та ін. - 2013.
2. Kinloch A. J. Adhesion and Adhesives: Science and Technology. - Chapman and Hall, London, 1987. - 441 p.

УДК 631.563.2.003

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ, ЩО ВИНИКАЮТЬ ПІД ЧАС ОБРОБКИ СТІЧНИХ ВОД ВИСОКОВОЛЬТНИМИ ІМПУЛЬСНИМИ РОЗРЯДАМИ

Олійник Ю.О., аспірант, Заблодський М.М., д.т.н., проф.,
Національний університет біоресурсів і природокористування України

Метою роботи є дослідження процесів, якими **супроводжується** електроімпульсна обробка стічних вод **у** закритій камері шляхом використання розробленої електротеплової осесиметричної (2D Axisymmetric) моделі розрядного проміжку в рідкому свинячому гної.

Оскільки в рідкому середовищі під час міжелектродного розряду відбувається багато складних **явищ** (утворення та розширення парогазової порожнини, генерація ударних хвиль, кавітація, електрофізичні, плазмохімічні процеси тощо)**,** їх комплексне вивчення **є важливим** для розробки або **удосконалення** існуючих технологій обробки стічних вод. До прикладу ефективність фрагментації інуліну у водних розчинах під впливом оброблення електроіскровими розрядами, як модельних розчинів, так і дифузійних соків спостерігається коагуляція з наступним осадженням білкових речовин [1, 2].

Для аналізу подібних процесів та оптимізації параметрів робочої камери розроблено базову електротеплову осесиметричну (2D Axisymmetric) модель розрядного проміжку в рідкому свинячому гної. Розрахункова область представлена циліндричним резервуаром із провідним рідким середовищем (Рис.1), у який введено два електроди, розташовані симетрично відносно площини z = 0. Електроди мають циліндричну основу, що переходить в усічено-конічні загострені наконечники.

Побудована 2D Axisymmetric модель є базовою електротепловою моделлю двоелектродної системи у провідній рідині. Вона коректо відтворює геометричну концентрацію електричного поля поблизу наконечників і демонструє лінійне зростання E та J зі збільшенням напруги.

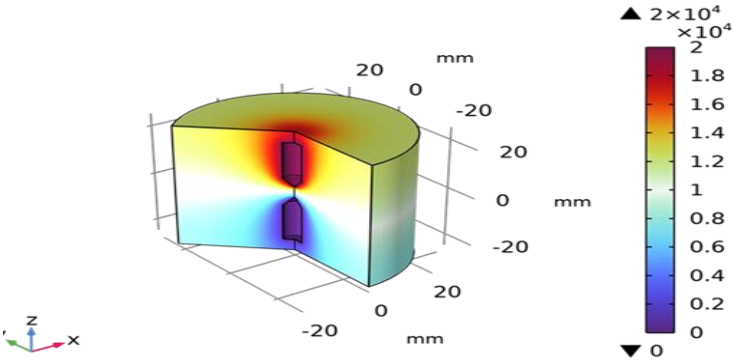


Рис. 1. 3D-модель розподілу електричного потенціалу у резервуарі

Ця модель дозволяє досліджувати:

- Розподіл електричного потенціалу V(r,z) у резервуарі.
- Локалізацію зон максимального електричного поля біля наконечників електродів.
- Розподіл та максимальне значення густини струму J.
- Вплив амплітуди напруги на Emax та Jmax.
- Просторовий розподіл джоулевого тепловиділення QJ.
- Зміну температури в часі для заданої тривалості імпульсу.
- Порівняння різних міжелектродних відстаней, геометрії наконечника та електропровідності середовища

Висновок. Модель може використовуватися як інженерна попередня оцінка перед фізичним експериментом. З її допомогою можна визначати, де саме очікується найбільша концентрація поля, порівнювати різні форми електродів, вибирати міжелектродний проміжок, оцінювати відносний вплив напруги та електропровідності, а також формувати діапазони параметрів для подальших експериментальних досліджень.

Перелік джерел посилань

1. Рижков, А. О. (2012). Моделювання камери високовольтної електроімпульсної обробки біомаси з ізольованим електродом. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну*.

2. Попова, І. В., Вєрченко, Л. М., & Слива, Ю. В. (2009). Дослідження впливу електрогідравлічного оброблення на перехід складових в екстрагент цукровмісної рослинної сировини.

3. Котовський, В. Й., & Кінзерський, А. (2023). Комп'ютерне моделювання у вирішенні завдань теплопровідності.

УДК 631.24.243

ПОВЕДІНКОВІ ЧИННИКИ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ В СИСТЕМАХ ЕНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТУ

Радько І.П., к.т.н., доцент; Наливайко В. А., к.т.н., доцент; Окушко В. О., к.т.н., доцент; Червінський Л. С., д.т.н., професор

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

Сучасний енергоменеджмент передбачає не лише контроль споживання електричної енергії, тепла та інших енергоресурсів, але й урахування поведінки людей, які використовують обладнання та приймають рішення щодо його експлуатації. Навіть за умови технічної модернізації фактична економія енергії може відрізнятися від очікуваної через звички користувачів, режими роботи обладнання, увагу операторів і сформовані в колективі норми поведінки.

Мета роботи – обґрунтування можливостей застосування підходів поведінкової економіки для підвищення енергоефективності та вдосконалення систем управління енергоспоживанням.

Поведінкова економіка доповнює традиційні підходи до управління енергоспоживанням положеннями психології та експериментальної економіки. Вона враховує вплив уваги, звичок, сприйняття витрат, соціальних норм і способів подання інформації на рішення споживачів. Унаслідок цього ефективність енергоменеджменту визначається не лише технічними характеристиками обладнання, але й тим, як організовано його використання та взаємодію людини з технічною системою.

Перспективними інструментами поведінкового впливу є надання користувачам зворотного зв'язку про фактичне споживання енергії, встановлення зрозумілих цілей енергозбереження, інформування про результати колективної діяльності, застосування енергоощадних налаштувань за замовчуванням та автоматизація керування обладнанням. Водночас результативність таких заходів залежить від особливостей об'єкта, груп користувачів і способу організації втручання, тому їх необхідно попередньо оцінювати та перевіряти на практиці.

Для системного застосування поведінкових підходів запропоновано замкнутий цикл управління: ***вимірювання енергоспоживання – поведінкова діагностика – впровадження заходів – оцінювання результатів – адаптація рішень.*** Такий підхід узгоджується з принципом постійного поліпшення систем енергоменеджменту відповідно до ISO 50001:2018.

Практична реалізація цього циклу можлива із застосуванням інтелектуальних лічильників, технологій Інтернету речей (IoT), систем SCADA/EMS і цифрових панелей моніторингу. Вони забезпечують отримання даних про споживання енергоресурсів, відображення результатів для користувачів та оцінювання змін після впровадження енергоощадних заходів. Поєднання цих технологій із поведінковими методами створює передумови для переходу від загальних рекомендацій до управління, заснованого на фактичних даних.

Перспективним напрямом подальших досліджень є розроблення персоналізованих моделей поведінки споживачів та використання машинного навчання для визначення ефективності різних способів інформування та мотивації. Це дасть змогу враховувати відмінності між групами користувачів і обирати найбільш результативні інструменти управління енергоспоживанням.

Урахування поведінкових чинників розширює можливості традиційного енергоменеджменту та сприяє підвищенню ефективності використання енергоресурсів. Поєднання поведінкової діагностики, цифрового моніторингу й

систематичного оцінювання результатів дає змогу виявляти причини нераціонального енергоспоживання, коригувати режими роботи обладнання та забезпечувати постійне вдосконалення енергетичних показників організації.

Перелік джерел посилань

1. Allcott H., Rogers T. The Short-Run and Long-Run Effects of Behavioral Interventions: Experimental Evidence from Energy Conservation. *American Economic Review*. 2014. Vol. 104, No. 10. P. 3003–3037. DOI: 10.1257/aer.104.10.3003.
2. Andor M. A., Fels K. M. Behavioral Economics and Energy Conservation – A Systematic Review of Non-price Interventions and Their Causal Effects. *Ecological Economics*. 2018. Vol. 148. P. 178–210. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2018.01.018.
3. ISO 50001:2018. *Energy management systems – Requirements with guidance for use*. International Organization for Standardization, 2018.

УДК 621.3:631.54

ПРИСТРІЙ ШВИДКОДІЙНОГО ІСКРОЗАХИСТУ ДЖЕРЕЛ ВИСОКОЇ НАПРУГИ

О.В. Окушко[1], П.М. Ковтун[2]

[1]Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

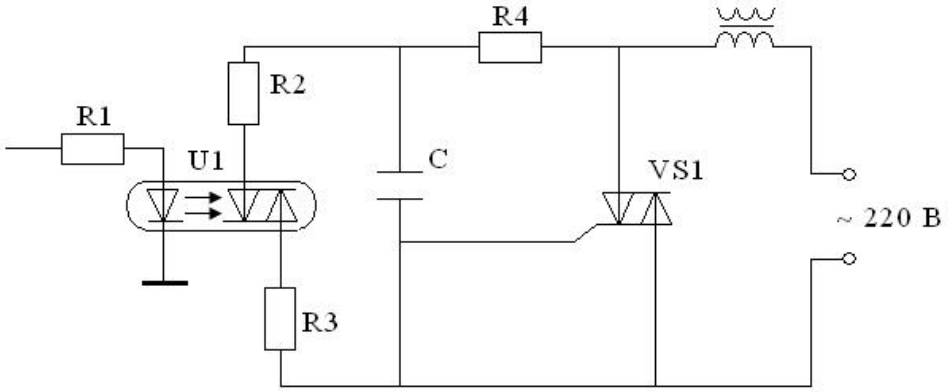
[2]Відокремлений структурний підрозділ «Немішаївський фаховий коледж НУБіП України» смт Немішаєве-1, Бучанський р-н, Київська обл., Україна

Під час експлуатації джерел високої напруги виникнення іскрових розрядів може призводити до порушення нормального режиму роботи електрообладнання, пошкодження елементів електричних кіл і зниження надійності технологічних установок. Особливо важливим є своєчасне виявлення перевантажень і швидке припинення подавання високої напруги у разі виникнення аварійного режиму.

Традиційні пристрої іскрозахисту можуть мати складну конструкцію або недостатню швидкодію, що обмежує їх ефективність за умов різкої зміни струму навантаження. Тому актуальним є вдосконалення схем захисту, які поєднують контроль електричних параметрів, електронне формування керувального сигналу та швидке відключення силового кола.

Метою роботи є удосконалення пристрою іскрозахисту шляхом застосування електронного контролю струму та швидкодійного керування силовим комутаційним елементом.

Контроль струму здійснюється вимірювальним колом та операційними підсилювачами, які порівнюють контрольований сигнал із заданим порогом. У нормальному режимі оптопара забезпечує керування силовим симістором, через який живиться високовольтний трансформатор (рис. 1).



У разі перевищення встановленого порога струму змінюється стан операційного підсилювача, оптопара припиняє передавання керувального сигналу, а симістор вимикається після зменшення струму до значення утримання, зазвичай поблизу переходу струму через нуль. У результаті припиняється живлення високовольтного трансформатора, що забезпечує захисну дію пристрою.

Практичне значення запропонованого рішення полягає в можливості використання електронного вузла швидкого реагування для захисту джерел високої напруги від ненормальних режимів. Поєднання порогового контролю, оптичної розв’язки та симісторного комутаційного елемента може спростити реалізацію керувального кола й підвищити надійність роботи установки.

Перелік джерел посилань

1. Іноземцев Г. Б., Окушко О. В. Шляхи попередження та обмеження енергії електричного пробою в електротехнологічних установках. Науковий вісник НУБіП України. 2011. № 166. С. 62–67.
2. Іноземцев Г. Б., Окушко О. В., Дульський Г. Б. Енергоресурсозберігаюча технологія виробництва покрить на металевих конструкціях опор ЛЕП. Енергетика та електрифікація. 2009. № 12. С. 18–20.
3. IEC 60947-4-1:2023. Low-voltage switchgear and controlgear – Part 4-1: Contactors and motor-starters – Electromechanical contactors and motor-starters. International Electrotechnical Commission. URL: https://webstore.iec.ch/en/publication/74487.
4. Rashid M. H. Power Electronics: Devices, Circuits, and Applications. 4th ed. Pearson, 2014.
5. IEC 60947-1. Low-voltage switchgear and controlgear – Part 1: General rules. International Electrotechnical Commission. Перед включенням до остаточного списку слід уточнити чинну редакцію стандарту та її застосовність до конкретного пристрою.

УДК 631.24.243

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТА СТІЙКОСТІ МІКРОМЕРЕЖ НА ОСНОВІ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ

Окушко В. О., к.т.н., доцент; Радько І.П., к.т.н., доцент;
Наливайко В. А., к.т.н., доцент; Чередниченко Р.Ю., аспірант
Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

Розвиток децентралізованої енергетики, поширення відновлюваних джерел енергії та підвищення вимог до надійності електропостачання зумовлюють необхідність удосконалення систем керування локальними енергетичними комплексами. Microgrid об’єднує розподілену генерацію, споживачів, накопичувачі енергії та засоби автоматизації в єдину систему. Така архітектура дає змогу координувати енергетичні потоки й, за наявності відповідних технічних засобів, працювати автономно в разі відключення зовнішньої мережі. Для України розвиток мікромереж має особливе значення в контексті забезпечення електроенергією підприємств, лікарень, навчальних закладів та інших критично важливих об’єктів.

Інтелектуальне керування Microgrid передбачає поєднання сенсорних мереж, програмованих логічних контролерів (PLC), систем диспетчерського керування SCADA, засобів передавання даних та алгоритмів оптимізації. SCADA забезпечує централізоване спостереження за параметрами обладнання, реєстрацію подій, сигналізацію несправностей і взаємодію між локальними контролерами. Інтеграція з технологіями IoT розширює можливості дистанційного контролю та оброблення інформації, отриманої від розподілених енергетичних установок.

Важливим напрямом є поєднання систем прогнозного технічного обслуговування з енергетичним менеджментом. У такому випадку під час формування керувальних рішень враховуються не лише потреби споживачів, але й технічний стан електродвигунів, поточне навантаження, доступність сонячної генерації та рівень заряду акумуляторів. Це створює можливості для своєчасного планування обслуговування, раціонального розподілу навантаження та зменшення ризику одночасного виходу з ладу критичних компонентів.

Різні дослідження в цьому напрямі демонструють практичні можливості інтеграції IoT, дистанційного моніторингу та цифрового моделювання в систему управління гібридною мікромережею. При цьому така конфігурація поєднує фотоелектричну установку потужністю 10 кВт, біогазовий генератор потужністю 15 кВА та акумуляторну систему ємністю 6 кВт·год, що дає можливість досліджувати координацію енергетичних ресурсів за змінних навантажень і перебоїв зовнішнього електропостачання. Цей приклад підтверджує доцільність комплексного використання моніторингу, автоматизації та алгоритмів енергоменеджменту.

Перспективним напрямом подальшого розвитку є застосування цифрових двійників – віртуальних моделей енергетичних об’єктів, що використовують фактичні експлуатаційні дані. Вони можуть допомагати моделювати режими роботи обладнання, оцінювати наслідки зміни навантаження та перевіряти керувальні рішення до їх реалізації. Водночас практична ефективність таких рішень залежить від точності моделей, надійності зв’язку та захищеності інформаційної інфраструктури.

Отже, інтеграція інтелектуального моніторингу, прогнозного технічного обслуговування та автоматизованого енергоменеджменту сприяє підвищенню надійності та енергоефективності Microgrid. Реалізація цього підходу створює передумови для оптимізації експлуатаційних витрат, ефективнішого

використання відновлюваних джерел енергії та підвищення стійкості локального електропостачання.

Перелік джерел посилань

1. Окушко О., Наливайко В., Радько І., Сорокін Д., Кудрук Д. Інтелектуальна система моніторингу та прогнозування стану електрообладнання на базі Microgrid / . Енергетика і автоматика, 2025. DOI: https://doi.org/10.31548/energiya5(81).2025.
2. Surucu O., Gadsden S. A., Yawney J. Condition Monitoring using Machine Learning: A Review of Theory, Applications, and Recent Advances. Expert Systems with Applications. 2023. Vol. 221, 119738. DOI: 10.1016/j.eswa.2023.119738.
3. Wu P., Mei X. Microgrids energy management considering net-zero energy concept: The role of renewable energy landscaping design and IoT modeling in digital twin realistic simulator. Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2024. Vol. 63, 103621. DOI: 10.1016/j.seta.2024.103621.
4. Digital twin based microgrid control and energy management: Trends, challenges, and future directions. Computers and Electrical Engineering. 2026. Vol. 134, 111100. DOI: 10.1016/j.compeleceng.2026.111100

УДК 631.24.243

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ І ПРОГНОЗУВАННЯ СТАНУ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ПОТУЖНІСТЮ ДО 15 кВт

Окушко В. О., к.т.н., доцент; Кишко О.В, магістр

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

Електродвигуни потужністю до 15 кВт широко використовуються в промисловості, сільському господарстві та комунальному господарстві для приводу насосів, вентиляторів, компресорів, транспортних механізмів та іншого технологічного обладнання. Надійність їхньої роботи безпосередньо впливає на стабільність виробничих процесів, енергоефективність і витрати на технічне обслуговування. Водночас експлуатація в умовах змінного навантаження, частих пусків і зупинок, коливань напруги живлення та недостатнього охолодження може спричиняти прискорене зношування ізоляції обмоток, перегрівання, механічні пошкодження й розвиток інших несправностей. Тому актуальним завданням є вдосконалення систем моніторингу та прогнозування технічного стану електродвигунів, що дає змогу виявляти дефекти на ранніх стадіях і своєчасно планувати технічне обслуговування.

Традиційні підходи до обслуговування електродвигунів переважно ґрунтуються на встановлених міжремонтних інтервалах або реагуванні на вже виявлені ознаки несправності. Однак такі підходи не завжди враховують фактичні умови експлуатації та індивідуальні особливості зміни технічного стану обладнання. Перспективним напрямом є перехід до прогнозного обслуговування, за якого рішення щодо проведення ремонтних робіт приймаються на основі результатів постійного або періодичного контролю діагностичних параметрів і оцінювання тенденцій їх зміни.

Для підвищення ефективності діагностики доцільно використовувати комплексний аналіз електричних, теплових і механічних параметрів. До основних контрольованих величин належать фазні струми та напруги, температура корпусу, частота обертання ротора, вібраційні характеристики й активний опір обмоток статора. Особливе значення має аналіз спектрального складу струму статора, оскільки зміни його гармонічних складових можуть свідчити про виникнення внутрішніх пошкоджень. Зокрема, міжвиткові замикання здатні спричиняти характерні зміни фазних струмів і збільшення амплітуд окремих гармонік, зокрема другої та п’ятої. Виявлення таких змін дає змогу своєчасно ідентифікувати потенційно небезпечні режими роботи.

Додатковим інформативним параметром є активний опір обмоток статора. Його значення залежить від температури провідників, тому контроль опору дає можливість оцінювати тепловий стан електродвигуна та відстежувати зміни, пов’язані зі старінням ізоляції та тривалою експлуатацією. Поєднання інформації про фазні струми, активний опір і спектральні характеристики забезпечує комплексніше оцінювання технічного стану порівняно з використанням одного діагностичного показника. Водночас ефективність такого підходу залежить від точності вимірювань, характеру навантаження та швидкості розвитку несправності.

Для дослідження процесів діагностування та прогнозування технічного стану електродвигунів застосовано математичне моделювання в середовищі MATLAB/Simulink. Модель дає змогу аналізувати зміну діагностичних параметрів за різних режимів роботи та досліджувати реакцію системи на виникнення характерних дефектів. На основі отриманих даних може бути сформовано алгоритм моніторингу, який передбачає вимірювання електричних параметрів, контроль температури корпусу й частоти обертання, оброблення інформації та визначення ознак відхилення від нормального режиму. Такий підхід створює передумови для автоматизованого виявлення несправностей без необхідності встановлення додаткових датчиків для кожного діагностичного параметра.

Практичне застосування вдосконаленої системи моніторингу спрямоване на підвищення надійності електроприводів, зменшення ймовірності аварійних зупинок і скорочення витрат на ремонт. Своєчасне виявлення ознак перегрівання та електричних пошкоджень дає змогу запобігати подальшому погіршенню стану обладнання, знижувати ризик розвитку складних несправностей і підвищувати ефективність використання електроенергії. Отже, комплексний моніторинг і прогнозування технічного стану електродвигунів потужністю до 15 кВт є перспективним засобом удосконалення їх експлуатації, що поєднує контроль діагностичних параметрів, аналіз характерних ознак дефектів і математичне моделювання для обґрунтування своєчасних технічних рішень.

Перелік джерел посилань

1. Окушко О., Наливайко В., Радько І., Сорокін Д., Кудрук Д. Інтелектуальна система моніторингу та прогнозування стану електрообладнання на базі Microgrid / . Енергетика і автоматика, 2025. DOI: https://doi.org/10.31548/energiya5(81).2025.

2. Чорний О. П., Зачепа Ю. В., Титюк В. К., Чорна О. А. Моніторинг і діагностика електромеханічних об’єктів : навчальний посібник. Кременчук, 2019. 122 с.
3. Яворський І. М., Драбич П. П., Кравець І. Б., Мацько І. Й. Методи вібраційної діагностики початкових стадій пошкодження обертових систем. Фізико-хімічна механіка матеріалів. 2011. Т. 47, № 2. С. 134–140.
4. Іноземцев Г. Б., Окушко О. В., Козирський В. В. Енергозбереження в системах електропостачання сільського господарства : навчальний посібник / за ред. Г. Б. Іноземцева. Київ : ЦП «Компринт», 2015. 151 с.
5. Benninger M., Liebschner M., Kreischer C. Fault detection of induction motors with combined modeling- and machine-learning-based framework. Energies. 2023. Vol. 16, No. 8. Article 3429. DOI: https://doi.org/10.3390/en16083429.

УДК 631.24.243

ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

Наливайко В. А., к.т.н., доцент; Лебеда О., аспірант
Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

Для роботи промислових підприємств з'явились важливі виклики, які обумовлені нестабільною роботою електроенергетичної системи внаслідок пошкоджень об'єктів енергосистеми ворожими обстрілами. Крім того, зростаючі ціни на енергоносії та обмеження споживання максимальної потужності приносять значні збитки промисловості. Справитися з цими викликами допоможуть промислові системи накопичення енергії. За допомогою цих систем можна накопичувати електроенергію від власних генеруючих потужностей (наприклад дахових СЕС), або закупляти на енергоринку в час за мінімальним тарифом і використовувати її в періоди пікового споживання або високих тарифів [4].

Нами досліджувались промислова система накопичення енергії MPack 261AS, яка зберігає 261 кВт·год електроенергії для подальшого використання та формує стабільний енергетичний резерв [1,3]. Система підтримує безпосереднє живлення від сонячної електростанції, автономного генератора та електромережі. Гнучке програмне забезпечення оптимізує алгоритми заряджання та розряджання, керує роботою інверторів, генераторів, сонячних станцій та вітрових турбін, синхронізуючи їх роботу з мережею. Аналіз перехідних процесів при електроживленні із частими вимиканнями показав, що час перемикання (менше 20 мс) не впливає на роботу електронних систем та іншого чутливого електрообладнання. Можливість короткочасного двократного перевантаження вирішує технічні проблеми із запуском потужних асинхронних електродвигунів уникаючи застосування додаткових пристроїв плавного пуску. Система також дозволяє збільшувати ємність шляхом паралельного приєднання додаткових модулів. Звісно, що обгрунтування вибору ємності та потужності такої системи має базуватися на детальному аналізі добових графіків навантаження та моделюванні роботи системи електроживлення нової конфігурації з урахуванням фінансових витрат.

В цілому при впровадженні промислових систем накопичення енергії можна вирішувати наступні технічні завдання:

- зрізання піків споживання при загрозі перевищення дозволеної максимальної потужності;
- забезпечення резервного та аварійного живлення;
- інтеграція власних поновлювальних джерел живлення та підвищення їх енергоефективності;
- зменшення витрат за використану електроенергію за умови використання почасових тарифів;
- збільшення надходжень за продану електроенергію на енергоринку.

Висновки. Сучасні промислові системи накопичення енергії здатні допомогти побороти техногенні виклики. Високі показники енергоефективності таких систем досягаються при використанні математичних моделей управління енергоспоживанням. Система накопичення енергії сучасного промислового підприємства - це не тільки «зелена» технологія, а інструмент фінансової оптимізації, енергетичної незалежності та сталого бізнесу, що дозволить підприємствам мінімізувати витрати на енергію та підвищить надійність енергоспоживання.

Перелік джерел посилань

1. The MPack 261AS stores 261 kWh of energy, offering flexible integration with solar, diesel, and grid power. Режим доступу https://www.renonpower.com/Products/Commercial-Industrial-BESS/MPack-261AS.html.
2. Research of roof solar power plant in hot water supply installations / Nalyvaiko, V., Radko I., Okushko, O., Bereziuk A., Antypov I., Mrachkovska N. // Przeglad Elektrotechniczny, 2023, 99(4), pp. 98–101
3. Оксенич Р. В., Мірошник О. О. (2024). Порівняльний аналіз накопичувачів енергії різних типів — літій-залізо-фосфатних (LiFePO4) та натрій-іонних (Na-Ion). Енергетика та ресурсозбереження в електроенергетиці, 2(9).
4. Закладний О. О., та ін. (2025). Техніко-економічний аналіз сучасних технологій зберігання енергії для енергетичних систем України. Електронний архів наукових публікацій КПІ ім. Ігоря Сікорського.

УДК 621.3:631.54

СУЧАСНІ ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЇ ВІДНОВЛЕННЯ ІЗОЛЯЦІЇ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ДЛЯ АГРОПРОМИСЛОВОГО КОМПЛЕКСУ

П.М. Ковтун[1], О.В. Окушко[2], Tetiana Knyzhka

[1]Відокремлений структурний підрозділ «Немішаївський фаховий коледж НУБіП України»

смт Немішаєве-1, Бучанський р-н, Київська обл., Україна

[2] Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

[3]University of Tasmania, Australia

У ремонтному виробництві агропромислового комплексу (АПК) значна частина технологій виготовлення, відновлення та ремонту електротехнічного обладнання характеризується підвищеними витратами енергетичних і

матеріальних ресурсів, низькою продуктивністю та значною трудомісткістю. Одним із найбільш вразливих елементів електричних машин і апаратів є ізоляція, відновлення якої потребує ефективних технологічних методів просочення та обробки ізоляційних матеріалів.

Перспективним напрямом удосконалення ремонтних технологій є використання електротехнологічних методів, що ґрунтуються на застосуванні акустичних коливань ультразвукового діапазону, електромагнітних полів та коронного розряду. Їх використання дає змогу інтенсифікувати просочення капілярно-пористих матеріалів, підвищити рівномірність проникнення робочих розчинів і поліпшити ізоляційні та механічні властивості оброблених матеріалів.

Згідно з результатами досліджень, застосування ультразвукової обробки може скоротити тривалість просочення в 1,5 – 12 разів, забезпечити рівномірність проникнення робочих розчинів до 98 % та збільшити глибину просочення до 30 – 60 мм порівняно з 1 – 5 мм за традиційних методів. Скорочення часу обробки також створює передумови для зниження енерговитрат на 50 – 60 % у межах відповідних технологічних операцій.

Рекомендовані параметри ультразвукового просочення: частота акустичних коливань 18 – 24 кГц, температура розчину 19–21 °С, тривалість обробки 8 – 10 хв та інтенсивність 0,5 – 5,0 Вт/см². Об’єм робочої ємності визначається габаритами об’єктів і може становити 0,5 – 1,5 м³.

Як просочувальні матеріали пропонується використовувати термореактивні та кремнійорганічні лаки, зокрема марок БТ, ФЛ і КО. Для обробки окремих видів матеріалів можуть застосовуватися електроліти. Особливий інтерес становлять комбіновані методи з одночасним використанням змінних і постійних електромагнітних полів, які сприяють інтенсифікації просочення тонких і листових ізоляційних матеріалів, склотекстоліту, лакотканини та матеріалів деревного походження.

Практичне значення запропонованих технологій полягає в можливості їх використання в ремонтних майстернях сільськогосподарських підприємств і фермерських господарств. За наведеними в дослідженні оцінками, впровадження електротехнологічних методів може забезпечити скорочення енерго- та ресурсних витрат відповідно на 30 – 40 % і до 60 %, зниження трудомісткості до 60 % та скорочення тривалості обробки залежно від її призначення у 5 – 12 разів.

Отже, застосування ультразвукових акустичних коливань та інших електротехнологічних методів є перспективним напрямом удосконалення ремонту електрообладнання в АПК. Інтенсифікація процесів просочення ізоляційних матеріалів сприяє підвищенню продуктивності ремонтних робіт, поліпшенню якості відновлення ізоляції та зменшенню витрат енергетичних, матеріальних і трудових ресурсів. Подальше впровадження цих технологій доцільно орієнтувати на адаптацію обладнання до умов експлуатації невеликих ремонтних майстерень і сільськогосподарських підприємств.

Перелік джерел посилань

1. Окушко О. В., Радько І. П., Васюк В. В., Наливайко В. А. Сучасний стан розвитку електротехнологій в рослинництві України // Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету. 2024. Т. 14, № 2. DOI: 10.32782/2220-8674-2024-24-2-25.
2. Іноземцев Г. Б., Червінський Л. С., Берека О. М., Окушко О. В. Фізико-технологічні та електрофізичні властивості сільськогосподарських продуктів і матеріалів / за ред. Г. Б. Іноземцева. // Агрармедіа, 2010 – 258 С.
3. Іноземцев Г. Б., Окушко О. В. Енергозберігаюча технологія стимуляції росту рослин // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. 2009. Т. 1. С. 184–189.
4. Іноземцев Г. Б., Окушко О. В. Технологічні аспекти зберігання продукції рослинництва із застосуванням аероіонізації // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. 2005. Вип. 31. С. 3–7.
5. Окушко О. В., Ковтун П. М. Перспективи застосування електротехнологій при відновленні і ремонті машин і обладнання // Електроенергетика, електромеханіка та технології в АПК : матеріали Міжнародної науково-практичної конференції, 6 листопада 2024 р., м. Харків. 2024.

УДК 621.313.004.94

РОЗРОБКА СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ДЛЯ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА СТРІЧКОВОГО КОНВЕЄРА

Кириленко Ю.Є., здобувач вищої освіти; Васюк В.В., к.т.н., доцент[1]

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна.

Сучасне промислове виробництво потребує раціонального використання енергоресурсів, що набуває першочергового значення. Експлуатація асинхронних двигунів у складі конвеєрних ліній часто супроводжується значними енергетичними втратами та ризиками механічних і струмових перевантажень. Перспективним підходом до розв'язання цієї проблеми є модернізація систем управління шляхом впровадження тиристорних регуляторів напруги (ТРН), що поєднують алгоритми оптимізації енергоспоживання та надійного комплексного захисту електропривода [1].

Метою роботи є розроблення та комплексне дослідження системи керування асинхронним двигуном стрічкового конвеєра на базі тиристорного регулятора напруги з інтегрованою функцією захисту від перевантажень. Дослідження базується на застосуванні комп'ютерного моделювання у програмному комплексі MATLAB/Simulink. Математичну основу імітаційної моделі становить система диференціальних рівнянь електромеханічного перетворення енергії та базове рівняння руху електропривода:

$$J\times(d(\omega/dt)=M-Mc$$

де J – зведений момент інерції системи; ω – кутова швидкість ротора; M – електромагнітний момент асинхронного двигуна; Mc – статичний момент опору стрічкового конвеєра. Для оцінки ефективності розроблено імітаційну модель електромеханічної системи, що включає асинхронний електродвигун AIP315S6 та тиристорний перетворювач Siemens SIRIUS 3RW55. [2].

Проведено порівняльний аналіз прямого та плавного пусків двигуна. Результати моделювання підтверджують, що використання ТРН забезпечує зниження пускових струмів на 70%. Це суттєво розвантажує електромережу та

усуває механічні удари в кінематичному ланцюзі привода. Динамічне перерегулювання за швидкістю під час плавного пуску не перевищує допустимої норми. Впровадження мікропроцесорного керування дозволяє автоматично виконувати захисні функції, обмежуючи струми перевантаження та запобігаючи аварійним ситуаціям.

Економічне обґрунтування підтвердило високу рентабельність запропонованої модернізації: розрахункова річна економія електроенергії становить 30 000 кВт·год, а загальна фінансова економія досягає 223 000 грн на рік. Розрахунковий термін окупності проєкту не перевищує 1,3 роки. Таким чином, запропоновані технічні рішення повністю готові до впровадження при модернізації промислових конвеєрних ліній для підвищення їх енергоефективності та експлуатаційної надійності.

Перелік джерел посилань

1. Васильєв В.О. Електропривод: теорія і практика. – Київ: Техніка, 2019. – 320 с.
2. Schneider Electric. Технічний опис Altivar ATS480. – Schneider Electric, 2023. – 75 с.

УДК 631.371

УСТАНОВКА ДЛЯ КОНТРОЛЮ РОБОЧИХ ПАРАМЕТРІВ ТА ОЦІНЮВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА

Гайдукевич С.В.[1], старший викладач; Семенова Н.П.[1], старший викладач

[1]Відокремлений підрозділ Національного університету біоресурсів і природокористування України "Бережанський агротехнічний інститут"

Асинхронні двигуни є ключовими компонентами в промисловості [1, с. 3] та в сільськогосподарському виробництві, де вони широко використовуються для приводу різноманітних технологічних установок, машин і механізмів.

Проблеми, які виникають під час експлуатації двигунів носять диференційний характер, що залежить від різноманітних факторів. Несправності та відхилення робочих параметрів зумовлені впливом електричних, механічних і теплових чинників. Тому пошук нових підходів у загальному арсеналі сучасних методів діагностики технічного стану асинхронних двигунів [2, с. 8] насьогодні є актуальним завданням. Оскільки аналіз сучасних методів діагностування показує, що кожен із них дає змогу оцінити лише окремі характеристики або складові технічного стану асинхронного електродвигуна, що обмежує можливості комплексного оцінювання його працездатності.

З урахуванням виявлених обмежень існуючих методів діагностування було розроблено спеціалізовану діагностичну установку (рис. 1), призначену для комплексного контролю основних електричних та енергетичних параметрів асинхронного електродвигуна в різних режимах його роботи. Запропонована установка забезпечує можливість вимірювання робочих параметрів двигуна, їх реєстрації та подальшого порівняння з паспортними значеннями, що дає змогу виявляти відхилення від нормованих характеристик і своєчасно оцінювати його технічний стан.

Важливою перевагою розробленої установки є можливість підключення до персонального комп'ютера для автоматизованого збору, реєстрації та збереження результатів вимірювань, формування протоколів діагностування й аналізу зміни контрольованих параметрів у часі.

Розроблена установка складається із декількох основних функціональних вузлів:

-силового вузла, що виконує підключення асинхронного електродвигуна до мережі та подачу живлення;

-вузла керування призначеного для запуску та зупинки електродвигуна;

-вимірювального вузла, який забезпечує контроль основних електричних та енергетичних параметрів електродвигуна;

-комутаційного вузла, що виконує зміну конфігурації електричних з'єднань та режимів досліджуваного електродвигуна, зокрема, вибору режиму живлення двигуна від електричної мережі або через частотний перетворювач;

-вузла захисту, що призначений для захисту електричних кіл і обладнання від аварійних режимів;

-вузла реєстрації, обробки інформації та аналізу результатів вимірювань за допомогою підключення комп'ютера.

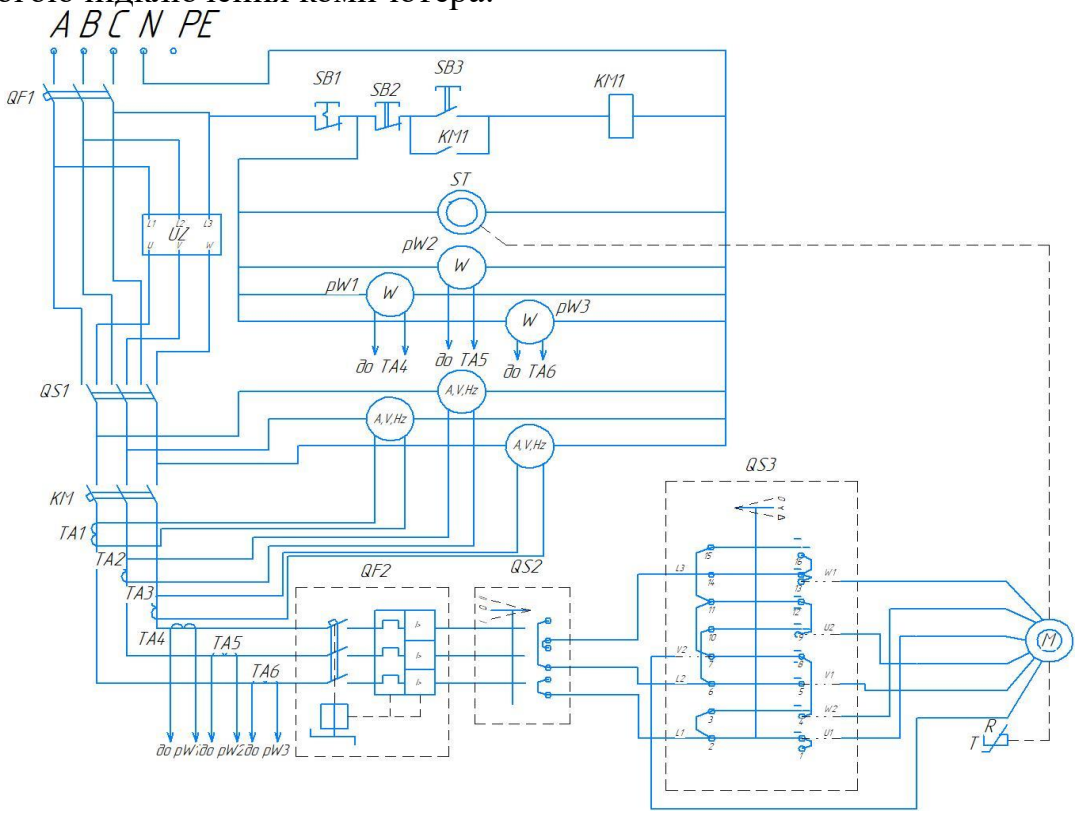


Рис.1. Принципова електрична схема спеціалізованої установки

Використання частотного перетворювача значно розширює діагностичні можливості установки, оскільки дає змогу досліджувати роботу електродвигуна за різних значень частоти і напруги живлення, а також аналізувати особливості його роботи під час зміни швидкості обертання. Окрім того, частотний перетворювач може надавати інформацію про поточні значення параметрів і реєструвати окремі показники та аварійні стани. Це створює додаткові

можливості для оцінювання характеру роботи електродвигуна та виявлення відхилень його параметрів.

Висновок. Такий підхід створює передумови для відстеження динаміки розвитку несправностей, виявлення ознак погіршення технічного стану електродвигуна та своєчасного прийняття рішень щодо необхідності проведення технічного обслуговування або ремонту.

Перелік джерел посилань

1.Змій С.О., Прилипко А.А., Сосунов О.О., Щебликіна О.В. Діагностика асинхронного двигуна з використанням зняття зубцевих характеристик та обробки даних з використанням штучного інтелекту. *Інформаційно – керуючі системи на залізничному транспорті*, 2025. № 3. С. 3-13.

2. Шавкун В.М., Ліньков В.В. Аналіз сучасних методів діагностики технічного стану асинхронних двигунів. *Комунальне господарство міст*, 2019. Т. 5, Вип. 151. С. 8-12.

УДК 621.355.2:621.3.019.3

РОЗРОБЛЕННЯ ІНТЕГРАЛЬНОГО КОЕФІЦІЄНТА ОДНОРІДНОСТІ ВИКОРИСТАНИХ АКУМУЛЯТОРНИХ КОМІРОК $LiFePO_4$ ДЛЯ ФОРМУВАННЯ БАТАРЕЙ ПОВТОРНОГО ВИКОРИСТАННЯ

Лисіков О.Ю., аспірант, Червінський Л.С. д.т.н., професор,

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна.

Проблема ефективного повторного використання літій-іонних акумуляторних батарей набуває особливої актуальності у зв’язку зі збільшенням кількості електротранспорту, промислових електронавантажувачів і систем накопичення електричної енергії. Після завершення першого циклу експлуатації акумуляторні комірки можуть зберігати значну частину початкової ємності, проте відрізнятися за внутрішнім опором, швидкістю саморозряду, температурною реакцією та здатністю віддавати електричну енергію під навантаженням. Тому визначення залишкового ресурсу окремої комірки не забезпечує повної оцінки її сумісності з іншими комірками під час формування акумуляторної батареї повторного використання.

Особливого значення ця проблема набуває для літій-залізо-фосфатних акумуляторів ($LiFePO_4$), які характеризуються високою циклічною довговічністю, термічною стабільністю та можливістю використання в тягових системах, джерелах безперебійного живлення й стаціонарних накопичувачах енергії. Водночас неоднорідність характеристик комірок може спричиняти нерівномірний розподіл навантаження, передчасне досягнення граничних значень напруги окремими комірками та зниження доступної ємності всієї батареї.

Метою роботи є розроблення експрес- методу оцінки стану використаних акумуляторних комірок $LiFePO_4$ інтегральним коефіцієнтом однорідності на основі сукупності електричних і теплових параметрів для підвищення ефективності їх сортування та формування батарей повторного використання.

Для оцінювання технічного стану акумуляторних комірок запропоновано використовувати комплекс показників, що охоплює залишкову ємність, внутрішній опір постійному струму, зміну напруги під час імпульсного навантаження, температурну реакцію, напругу холостого ходу та інтенсивність саморозряду. Комплексна діагностика передбачає проведення первинного огляду, вимірювання напруги після періоду спокою, імпульсного випробування та скороченого циклу заряду-розряду для визначення фактичної ємності комірки.

На основі отриманих показників запропоновано інтегральний коефіцієнт однорідності, який об'єднує оцінки за залишковою ємністю, внутрішнім опором, зміною напруги під час імпульсного навантаження та температурною реакцією. Для попереднього оцінювання передбачено вагове врахування кожного показника з урахуванням його впливу на працездатність і сумісність акумуляторних комірок. Найбільшу вагу запропоновано надавати залишковій ємності та внутрішньому опору, оскільки ці характеристики суттєво впливають на доступну енергію батареї та розподіл навантаження між її складовими.

Значення інтегрального коефіцієнта, наближене до одиниці, свідчить про високу однорідність групи, тоді як його зменшення вказує на збільшення розбіжностей між комірками. Для запобігання ситуаціям, коли задовільний середній показник приховує наявність слабкої комірки, додатково передбачено визначення показника найслабшого елемента за залишковою ємністю та внутрішнім опором. Це дає змогу враховувати обмежувальний вплив комірки, яка може визначати фактичну працездатність усієї акумуляторної батареї.

Практичне застосування запропонованої методики передбачає формування груп комірок зі співставними електричними характеристиками, оцінювання їхньої однорідності та подальший відбір для конкретного призначення. Залежно від результатів діагностики комірки можуть розглядатися для повторного використання в тягових акумуляторних батареях електронавантажувачів, системах безперебійного живлення або стаціонарних накопичувачах електричної енергії.

Запропонований підхід створює передумови для автоматизації сортування використаних акумуляторних комірок $LiFePO_4$, підвищення однорідності сформованих батарей і раціонального використання залишкового ресурсу електрохімічних накопичувачів енергії. Наукова новизна роботи полягає в комплексному оцінюванні однорідності акумуляторних комірок за ємнісними, резистивними, імпульсними та тепловими показниками з додатковим урахуванням характеристик найслабшого елемента. Практична цінність розробки полягає в можливості застосування інтегрального коефіцієнта для обґрунтованого комплектування акумуляторних батарей повторного використання відповідно до їхнього подальшого функціонального призначення.

Перелік джерел посилань

1. International Electrotechnical Commission. IEC 62619:2022. *Secondary cells and batteries containing alkaline or other non-acid electrolytes — Safety requirements for secondary lithium cells and batteries, for use in industrial applications*. Geneva: IEC, 2022.

2. Shcherbatiuk I., Bazievskiy A., Panchenko D. та ін. Electrochemical characteristics of $LiFePO_4$, recovered after battery degradation. *Ukrainian Chemistry Journal*. 2022. Т. 88, № 12. С. 189–198. DOI: 10.33609/2708-129X.88.12.2022.189-198
3. Надточій А.В., Гордєєв Б.М. Автоматизація контролю технічного стану акумуляторної електроенергетичної системи безекіпажного надводного судна. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*., №6, 2024. DOI:10.33216/1998-7927-2024-286-6-174-181

УДК 313.631

ЗАХОДИ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

Нижник В.О., студент; Радько І.П., к.т.н., доц.
Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна.

Підвищення якості електричної енергії передбачає комплекс технічних і організаційних заходів. Першим етапом має бути визначення фактичного стану електричної мережі шляхом проведення вимірювань.

Для зниження гармонічних спотворень можуть застосовуватися фільтри гармонік, сучасні перетворювачі з покращеними характеристиками та активні компенсатори. Для компенсації реактивної потужності використовують конденсаторні установки та інші компенсувальні пристрої.

Нерівномірність навантаження фаз може бути усунена шляхом раціонального розподілу однофазних споживачів. Для стабілізації напруги використовують трансформатори з регулюванням, стабілізатори та системи автоматичного регулювання.

Для критичних споживачів, робота яких не допускає навіть короткочасних перерв, застосовують джерела безперебійного живлення, акумуляторні системи, резервні генератори та інші засоби резервування.

Важливим напрямом є також правильний вибір потужності трансформаторів, кабелів і комутаційної апаратури. Робота обладнання з перевантаженням або близько до граничних режимів може погіршувати характеристики електричної мережі та скорочувати ресурс обладнання.

В Україні вимоги до якості електропостачання регулюються законодавством і нормативними документами. Закон України «Про ринок електричної енергії» передбачає окреме регулювання показників надійності, комерційної якості та якості електричної енергії. Положення щодо характеристик напруги електричних мереж пов'язані з EN 50160:2022 / ДСТУ EN 50160:2023.

Отже, забезпечення належної якості електричної енергії має здійснюватися на основі постійного контролю параметрів мережі, своєчасного виявлення відхилень та застосування відповідних технічних засобів. Комплексний підхід до вирішення цієї проблеми дає змогу підвищити надійність електропостачання, зменшити втрати електроенергії, продовжити строк експлуатації обладнання та забезпечити стабільність технологічних процесів.

Перелік літературних джерел

1. ДСТУ EN 50160:2023. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності (EN 50160:2022, IDT). Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2023. Стандарт визначає основні характеристики напруги електропостачання та є базовим нормативним документом для оцінювання її якості в Україні.
2. Кодекс систем розподілу. Затверджений постановою НКРЕКП від 14.03.2018 № 310. Документ містить вимоги щодо показників якості електричної енергії в точках приєднання споживачів та передбачає відповідність параметрів ДСТУ EN 50160:2023.
3. IEC 61000-4-30:2025. *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-30: Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods.* Geneva: International Electrotechnical Commission, 2025. 95 p. Стандарт встановлює методи вимірювання та інтерпретації показників якості електричної ен ергії, зокрема частоти, напруги, флікера, провалів і перенапруг, несиметрії, гармонік та інтергармонік.
4. IEC 61000-4-30:2015. *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-30: Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods.* Geneva: International Electrotechnical Commission, 2015. 146 p. Документ містить методики вимірювання основних параметрів якості електричної енергії; у 2025 році його замінено новою редакцією IEC 61000-4-30:2025.

УДК 636.2:621.383.51

РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ ІНФРАЧЕРВОНОГО ОБІГРІВУ ТЕЛЯТ

Червінський Л.С. д.т.н., професор;, Швиденко І.В., магістр
Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна.

Підвищення ефективності вирощування молодняку великої рогатої худоби значною мірою залежить від створення оптимальних параметрів мікроклімату в тваринницьких приміщеннях. Особливо важливим є забезпечення належних температурних умов для телят у ранній період їхнього життя, оскільки недостатній рівень теплового комфорту може спричиняти збільшення енергетичних витрат організму на підтримання температурного гомеостазу, погіршення умов утримання та зниження продуктивності тварин. Тому розроблення енергоефективних систем локального обігріву телят є актуальним науково-практичним завданням.

Одним із перспективних напрямів удосконалення систем обігріву молодняку великої рогатої худоби є застосування інфрачервоного випромінювання. На відміну від традиційних систем загального обігріву приміщень, інфрачервоні нагрівальні пристрої забезпечують передавання енергії безпосередньо до поверхонь, що перебувають у зоні опромінення. Поглинута енергія перетворюється на теплоту, завдяки чому створюються умови для локального обігріву тварин без необхідності підтримувати однаково високу температуру в усьому об'ємі приміщення. Це дає змогу розглядати інфрачервоне опромінення як один із можливих способів зниження витрат електроенергії на забезпечення теплового комфорту телят.

Ефективність інфрачервоного обігріву визначається спектральними характеристиками випромінювача, його електричною потужністю, висотою встановлення, тривалістю роботи, площею опромінюваної поверхні та

температурою навколишнього середовища. Важливе значення мають також теплоізоляційні характеристики огороджувальних конструкцій телятника, кратність повітрообміну та швидкість руху повітря. За недостатньої теплоізоляції приміщення та інтенсивного повітрообміну тепловтрати можуть істотно зростати, що необхідно враховувати під час проєктування системи.

Розроблення електротехнологічного обладнання для інфрачервоного обігріву передбачає визначення необхідної теплової потужності, вибір типу випромінювачів, обґрунтування їхнього розміщення та формування системи автоматичного керування. Для підвищення енергоефективності доцільно використовувати температурні датчики, контролер і силові комутаційні пристрої, які забезпечуватимуть регулювання роботи нагрівачів залежно від фактичних температурних умов у зоні перебування телят. Такий підхід дає змогу реалізувати диференційоване керування теплопостачанням і запобігати надмірному нагріванню окремих ділянок.

Метою роботи є розроблення системи інфрачервоного опромінення телят, яка забезпечує формування необхідних температурних умов у локальній зоні утримання, раціональне використання електричної енергії та автоматизоване регулювання теплового режиму залежно від параметрів мікроклімату.

Для досягнення поставленої мети передбачено визначення теплового балансу приміщення телятника, оцінювання тепловтрат через огороджувальні конструкції та систему вентиляції, обґрунтування потужності інфрачервоних випромінювачів і вибір їхнього розташування відносно місць утримання тварин. Окрему увагу приділено розробленню алгоритму автоматичного керування, який передбачає контроль температури в зоні перебування телят, увімкнення та вимкнення нагрівальних елементів відповідно до заданих параметрів і забезпечення захисту від перегрівання.

Запропонований підхід до побудови системи передбачає використання інфрачервоних випромінювачів, температурних датчиків, блока керування та силового комутаційного обладнання. Система повинна забезпечувати підтримання заданих температурних умов у зоні обігріву з урахуванням віку телят, температури навколишнього середовища та теплових характеристик приміщення. Для перевірки її працездатності доцільно застосовувати математичне моделювання теплових потоків і температурного поля, а також експериментальне оцінювання температури повітря та поверхонь у зоні перебування тварин.

Очікуваним результатом розроблення є створення технічно обґрунтованої системи локального інфрачервоного обігріву телят, яка забезпечуватиме можливість автоматичного регулювання теплового навантаження відповідно до фактичних умов утримання. Практичне використання такої системи може сприяти підвищенню енергоефективності обігріву, зменшенню непродуктивних тепловтрат і поліпшенню умов утримання молодняку великої рогатої худоби. Кількісне підтвердження цих переваг потребує проведення розрахункових та експериментальних досліджень.

Перелік джерел посилань

1. Сколоздра С. В., Чайковський Б. П., Лецик О. С. Розрахунок, вибір і контроль режиму інфрачервоного обігріву молодняка. *Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Ґжицького*. 2010. Т. 12, № 2(2). С. 274–279.
2. Gebremedhin K. G., Wu B. A model of evaporative cooling of wet skin surface and fur layer. *Journal of Thermal Biology*. 2002. Vol. 27, No. 7. P. 565–572.
3. Gebremedhin K. G., Cramer C. O., Porter W. P. Predictions and measurements of heat production and food and water requirements of Holstein calves. *Transactions of the ASAE*. 1983. Vol. 26, No. 3. P. 715–720.
4. Indoor Thermal Comfort Sector: A Review of Detection and Control Methods for Thermal Environment in Livestock Buildings. *Sustainability*. 2024. Vol. 16, no. 4. Art. 1662. DOI: https://doi.org/10.3390/su16041662

УДК621.133.05

ВПЛИВ РЕЖИМУ РОБОТИ ДВИГУНА НА ДИНАМІЧНІ Й ЕНЕРГЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАСОСНОГО АГРЕГАТУ

Гузенко В.В.[1,2], к.т.н., доцент; Чаусов С.В.[2], к.т.н., доцент;
[1]Державний біотехнологічний університет, м.Харків, Україна.
[2]Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного, м.Запоріжжя, Україна..

Відомо, що найбільш поширеними електричними машинами для привода насосів є трифазні асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором. Їх широке застосування обумовлене простою конструкцією, високою експлуатаційною надійністю, відносно невеликою вартістю, відсутністю контактних кілець і щіток та можливістю роботи в широкому діапазоні навантажень.

Насосні агрегати характеризуються значними моментами інерції, залежністю моменту опору від частоти обертання та необхідністю забезпечення плавної зміни продуктивності [1]. Тому дослідження електромеханічних властивостей асинхронного двигуна є важливим завданням при проектуванні та модернізації електропривода магістрального насоса.

Як показують дослідження, на сьогоднішній день особливого значення набуває застосування регульованого електропривода на базі частотного перетворювача, який дозволяє змінювати частоту обертання насоса відповідно до необхідної продуктивності та напору.

Метою роботи є дослідження електромеханічних властивостей асинхронного двигуна в системі електропривода магістрального насоса та визначення впливу режиму роботи двигуна на динамічні й енергетичні характеристики насосного агрегату.

Пусковий режим є одним із найбільш відповідальних режимів роботи електропривода магістрального насоса. Застосування частотного перетворювача дозволяє здійснювати плавний розгін двигуна. Такий спосіб пуску забезпечує зменшення пускового струму, зниження механічних ударів, зменшення навантаження на муфти та вал, плавне наростання продуктивності та зменшення гідравлічних ударів у трубопроводі.

Сучасний електропривод магістрального насоса доцільно будувати як замкнену систему автоматичного керування [2]. До основних контрольованих параметрів можуть належати: тиск на вході та виході насоса, продуктивність, частота обертання, струм двигуна, потужність, температура обмоток, вібрація та температура підшипників [3].

Регулятор на основі заданого значення технологічного параметра формує сигнал керування частотним перетворювачем.

Загальна структура пропонується така: задане значення → регулятор → частотний перетворювач → асинхронний двигун → насос → технологічний об'єкт → датчик → зворотний зв'язок.

Під час дослідження проведено порівняння нерегульованого та регульованого електроприводу і дані занесені до таблиці 1.

Таблиця 1 - Порівняння нерегульованого та регульованого електропривода.

Параметр	Нерегульований привод	Привод з частотним перетворювачем
Регулювання швидкості	Обмежене	Плавне
Пусковий струм	Значний	Знижений
Плавність пуску	Низька	Висока
Регулювання продуктивності	Дроселюванням	Зміною швидкості
Гідравлічні удари	Більша ймовірність	Значно менша
Енергоефективність при змінному навантаженні	Нижча	Вища
Автоматизація	Обмежена	Висока
Динамічні можливості	Обмежені	Широкі

У висновку зазначаємо:

1. При збільшенні навантаження насоса зростають електромагнітний момент, струм статора та ковзання, одночасно зменшується частота обертання ротора.

2. Застосування частотного перетворювача забезпечує плавний пуск асинхронного двигуна, зменшення пускових струмів, регулювання продуктивності та покращення динамічних характеристик насосного агрегату.

3. Найбільший потенціал енергозбереження регульований електропривод має при роботі магістрального насоса зі змінним навантаженням.

4. Оптимальна система електропривода магістрального насоса повинна поєднувати асинхронний двигун, частотний перетворювач, систему автоматичного керування та засоби контролю технологічних параметрів.

5. Подальші дослідження доцільно спрямувати на математичне моделювання електромеханічної системи «частотний перетворювач – асинхронний двигун – магістральний насос – трубопровід».

Перелік джерел посилань.
1. Синявський О. Ю. Електропривод і автоматизація: навчальний посібник / О. Ю. Синявський, П. І. Савченко, В. В. Савченко, Ю. М. Лавріненко, І. П. Ільїчов, Ю. М. Хандола. Київ: Аграр Медіа Груп, 2013. – 586с.
2. Шадура В. О. Водопостачання та водовідведення: навчальний посібник / В.О. Шадура, Н.В. Кравченко. Вид. 2-ге, перероб. і допов. – Рівне: НУВГП, 2023.-385с.
3. Електропривод у питаннях і відповідях: навч. посіб. для студентів вищ.навч.закл. / М.Л. Лисиченко, П.І. Савченко, О.К. Тищенко, В.В. Гузенко. — Х: ХНТУСГ; Факт, 2012. – 500 с.

УДК 621.313.333:004.942

МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ НАФТОГАЗОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

Курляк П.О., к.т.н., доцент
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна

Стратегічним завданням зміцнення енергетичної незалежності України на тлі безпрецедентного зростання вартості енергоносіїв є перехід технологічного обладнання промислових підприємств до енергоефективних режимів експлуатації. У нафтогазовій галузі понад 70 % парку електроприводів становлять системи змінного струму на базі асинхронних двигунів із короткозамкненим ротором, наймасовішими з яких є приводи насосів, вентиляторів і компресорів. Загальна встановлена потужність асинхронних електроприводів у країні сягає 40–50 млн кВт, тому підвищення ефективності перетворення енергії такими комплексами є одним із пріоритетних напрямів національної програми енергозбереження. Істотно спростити аналіз та оперативне керування динамічними режимами типових електроприводів технологічного обладнання дає змогу імітаційне комп’ютерно-орієнтоване моделювання.

Дослідженню режимів роботи електроприводів засобами прикладних програм присвячено значну кількість публікацій, у більшості з яких моделювання виконується в середовищі MATLAB/Simulink; окремі праці ґрунтуються на методі Bond Graph. Вибір конкретного комп’ютерно-орієнтованого підходу залишається суб’єктивним, оскільки кожен із них володіє потужними можливостями. В інженерній практиці додатково застосовується спрощене лінійне або лінеаризоване моделювання на основі однофазних заступних схем, яке дає змогу створювати нескладні математичні та наочні структурні моделі для побудови статичних і динамічних характеристик електропривода.

Для дослідження енергоефективних динамічних режимів роботи електромеханічних комплексів нафтогазової промисловості автором запропоновано застосування методу Bond Graph [1-2]. Модель електропривода подається у формі позначеного напрямленого графа, вершинами якого є підмоделі фізичних явищ, а стрілки символізують енергетичні зв’язки між ними. Такі зв’язки виражають ідеальний потік енергії між двома сполученими елементами та представлені двостороннім сигнальним потоком енергетично-

спряжених змінних зусилля $e(t)$ і потоку $f(t)$. Добуток цих змінних рівний миттєвій потужності $p(t)$ у визначений момент часу t, а велична енергії $e(t)$, яка передається через порт елементу, визначена як інтеграл по часу від потужності $p(t)$. Енергетичні змінні $e(t)$ і $f(t)$ знаходять відповідність у кожній фізичній підсистемі ЕП [1-2]. За допомогою симулятора 20-sim, розробленого нідерландською компанією Controllab Products [3], із Bond Graph моделі електромеханічного комплексу автоматично генеруються системні диференціальні рівняння, забезпечується їх вирішення та у графічній або текстовій формі відображають залежності змінних стану електроприводу в функції часу чи інших змінних.

На основі методології Bond Graph автором розроблено графо-енергетичні моделі електроприводів із двигунами постійного та змінного струму [4-6]. Від наявних аналогів запропоновані моделі відрізняються здатністю відображати у графічній формі потоки енергії між конструктивними елементами реальних об'єктів і враховувати взаємовплив електромагнітних та механічних процесів на режими роботи електропривода.

Застосування комп'ютерно-орієнтованих Bond Graph моделей для дослідження динамічних режимів роботи електроприводів надає можливість проводити аналіз енергетичних процесів у їх складових підсистемах різної фізичної природи. Таких підхід значно спрощує та прискорює прогнозування енергоефективних режимів роботи електроприводів та створює інструментальну основу для обґрунтування заходів енергозбереження в електромеханічних комплексах промислових підприємств.

Перелік джерел посилань

1. Borutzky, W. Bond Graph Modelling for Control, Fault Diagnosis and Failure Prognosis. Springer, 2021. XVIII, 317 p.DOI: 10.1007/978-3-030-60967-2
2. Karnopp, D. C., Margolis, D. L., Rosenberg, R. C. System Dynamics: Modeling, Simulation, and Control of Mechatronic Systems. 5th ed. Wiley, 2012. DOI: 10.1002/978111815281.
3. https://www.controllab.nl/technology/software/20-sim/
4. Курляк П. О. Застосування комп'ютерно-орієнтованого методу Bond Graph для дослідження перехідних процесів електроприводних відцентрових насосних агрегатів. Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Електротехніка і енергетика. 2011. № 11(186). С. 221–225.
5. Курляк П. О. Аналіз енергетичних потоків у системах різної фізичної природи електроприводних турбомашин / П. О. Курляк // Технологічний аудит і резерви виробництва. 2015. № 2/1(22). С. 12–17. DOI: https://doi.org/10.15587/2312-8372.2015.41406.
6. Костишин В.С. Створення комп'ютерно-орієнтованих моделей електроприводних агрегатів нафтогазової промисловості [Текст] / Володимир Костишин, Петро Курляк // Нафтогазова енергетика. – 2007. – № 1(2). – С. 50-56. – ISSN 1993-9868

УДК 636.5:628.8:621.3

РОЗРОБЛЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНОЇ СИСТЕМИ МІКРОКЛІМАТУ В ПТАШНИКУ З ІОНІЗАЦІЄЮ ПОВІТРЯ

Червінський Л.С. д.т.н., професор;, Кутовий Д.Л. ., магістр

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна.

Підвищення ефективності промислового птахівництва значною мірою залежить від забезпечення нормативних параметрів мікроклімату в пташниках. Температура, відносна вологість, швидкість руху повітря, концентрація вуглекислого газу, аміаку та пилу безпосередньо впливають на фізіологічний стан птиці, її продуктивність і санітарно-гігієнічні умови утримання. У зв'язку з цим актуальним завданням є розроблення електротехнологічних систем, які поєднують автоматизоване керування вентиляцією та іншими параметрами мікроклімату із застосуванням додаткових засобів оброблення повітря.

Одним із перспективних напрямів удосконалення систем забезпечення мікроклімату є використання аероіонізації. У процесі іонізації повітря утворюються позитивно або негативно заряджені аероіони, концентрація яких залежить від способу іонізації, напруженості електричного поля, конструкції іонізатора, повітрообміну та властивостей повітряного середовища. Для одержання аероіонів можуть використовуватися електричні установки на основі коронного розряду. Застосування таких пристроїв у птахівничих приміщеннях потребує обґрунтування режимів роботи, розміщення електродних систем і контролю просторового розподілу концентрації аероіонів.

Ефективність аероіонізації в пташнику залежить від взаємодії іонізаційної установки з вентиляційною системою. Повітряні потоки впливають на перенесення аероіонів, їх розподіл у просторі та втрати внаслідок рекомбінації й осадження на поверхнях. Наявність металевих конструкцій, обладнання, птиці та пилових частинок також може змінювати просторовий розподіл іонів. Тому під час проєктування системи необхідно враховувати геометричні параметри приміщення, продуктивність вентиляційного обладнання, розташування припливних і витяжних каналів, а також місця встановлення коронуючих електродів.

Важливим завданням є забезпечення автоматизованого керування основними параметрами мікроклімату та роботою іонізаційного обладнання.

Метою роботи є розроблення та дослідження електротехнологічної системи забезпечення мікроклімату в пташнику з іонізацією повітря, яка поєднує автоматизоване регулювання параметрів повітряного середовища із контрольованою роботою аероіонізаційного обладнання.

Для досягнення поставленої мети передбачено розроблення структурної схеми електротехнологічної системи, обґрунтування вибору вентиляційного та іонізаційного обладнання, визначення раціонального розташування коронуючих електродів і дослідження просторового розподілу концентрації негативних аероіонів у приміщенні. Окрему увагу приділено оцінюванню впливу повітрообміну на перенесення іонів, вибору контрольованих параметрів і розробленню алгоритму автоматичного керування установкою.

Запропонована система передбачає використання припливно-витяжної вентиляції, коронуючих електродів, високовольтного джерела живлення, вимірювальних датчиків і програмованого контролера. Вентиляційне обладнання забезпечує організований повітрообмін, а іонізаційна установка створює умови для формування заданої концентрації аероіонів у контрольованій

зоні. Контролер отримує інформацію про параметри мікроклімату та стан обладнання, після чого формує керувальні сигнали відповідно до встановленого алгоритму. Для безпечної експлуатації передбачаються електричне блокування, захист від аварійних режимів і припинення роботи високовольтного обладнання в разі виявлення несправності.

Дослідження просторового розподілу аероіонів проведено за допомогою математичного моделювання та експериментальних вимірювань у характерних точках приміщення. Математична модель враховує джерела утворення іонів, конвективне перенесення повітряними потоками, дифузію, рекомбінацію та втрати іонів на поверхнях..

Очікуваним результатом роботи є створення науково обґрунтованої електротехнологічної системи, яка забезпечує узгоджене керування вентиляцією та іонізацією повітря в пташнику. Практичне застосування системи може сприяти підвищенню керованості параметрів повітряного середовища та створенню належних умов утримання птиці. Водночас вплив аероіонізації на продуктивність, фізіологічний стан птиці й санітарні показники повітря потребує окремої експериментальної перевірки.

Перелік джерел посилань

1. ASHRAE. *ASHRAE Handbook—HVAC Applications*. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
2. Albright L. D. *Environment Control for Animals and Plants*. St. Joseph, MI: American Society of Agricultural Engineers, 1990.
3. North M. O., Bell D. D. *Commercial Chicken Production Manual*. 4th ed. New York: Chapman & Hall, 1990.
4. Madelin T. M., Wathes C. M. Air hygiene in a broiler house: comparison of deep litter with raised netting floors. *British Poultry Science*. 1989.
5. Jones E. K. M., Wathes C. M., Webster A. J. F. Avoidance of atmospheric ammonia by domestic fowls and the effect of early experience. *Applied Animal Behaviour Science*. 2001.

УДК 621.311

АНАЛІЗ ВПЛИВУ КРОКУ ДИСКРЕТИЗАЦІЇ НА ВИНИКНЕННЯ РОЗБІЖНОСТЕЙ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ЗНАЧЕНЬ АКТИВНОЇ ТА РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТЕЙ ДОБОВИХ ГРАФІКІВ НАВАНТАЖЕНЬ.

О.А. Босенко, аспірант; В.Є. Кривоносов, д.т.н., професор
Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна.

Сучасним рішенням ефективного споживання енергетичних ресурсів є впровадження системи «технічного обліку енергоресурсів» на базі АСКОЕ, який використовує цифрові лічильники та трансформатори струму різних типів [1]. В роботі [2], авторами опановано методику дослідження впливу показників якості електроенергії на технологічний об’єкт та отримано базу даних добового споживання активної та реактивної потужності, як технічним обліком так і повірочним аналізатором якості електроенергії. Проведені дослідження підтвердили, що достовірність роботи системи АСКОЕ залежить від

обгрунтованого вибору вимірювального та перетворюючого обладнання, урахування особливостей добових графіків навантаження.

Доведено, що для будови добових графіків потужностей, крок усереднення 1-годинної та 15-хвилинної дискретизації, не впливає на достовірність отриманих даних, розбіжність показників лежить в межах класу точності приборів. На рис. 1 наведений добовий графік споживання активної та реактивної потужностей трансформаторної підстанції (ТП), яка живить технологічний комплекс.

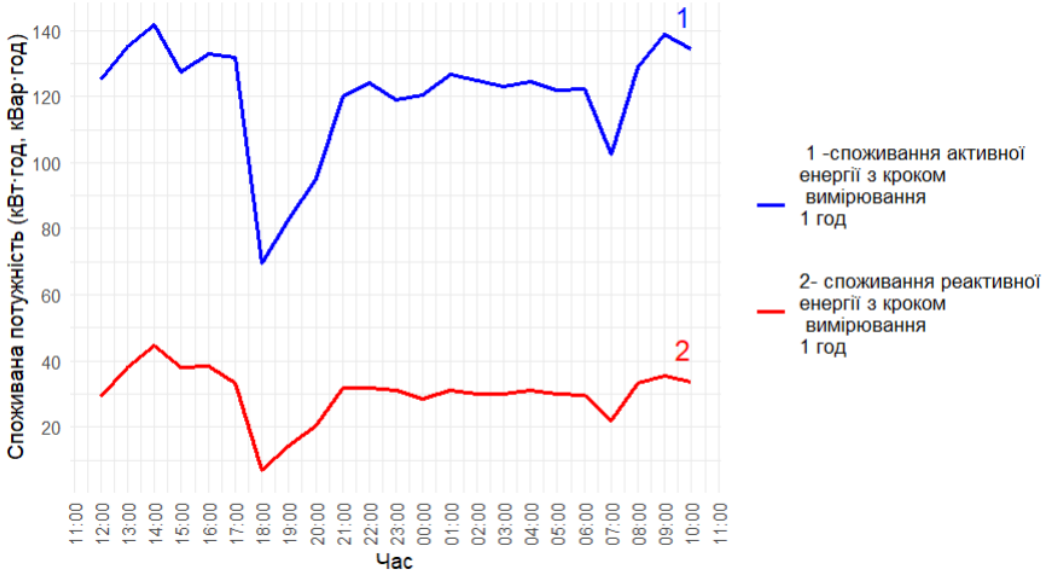


Рис. 1. Добовий графік споживання потужностей з кроком усереднення 1 год.

На рис. 2 наведений добовий графік споживання потужностей з кроком усереднення 15 хвилин.

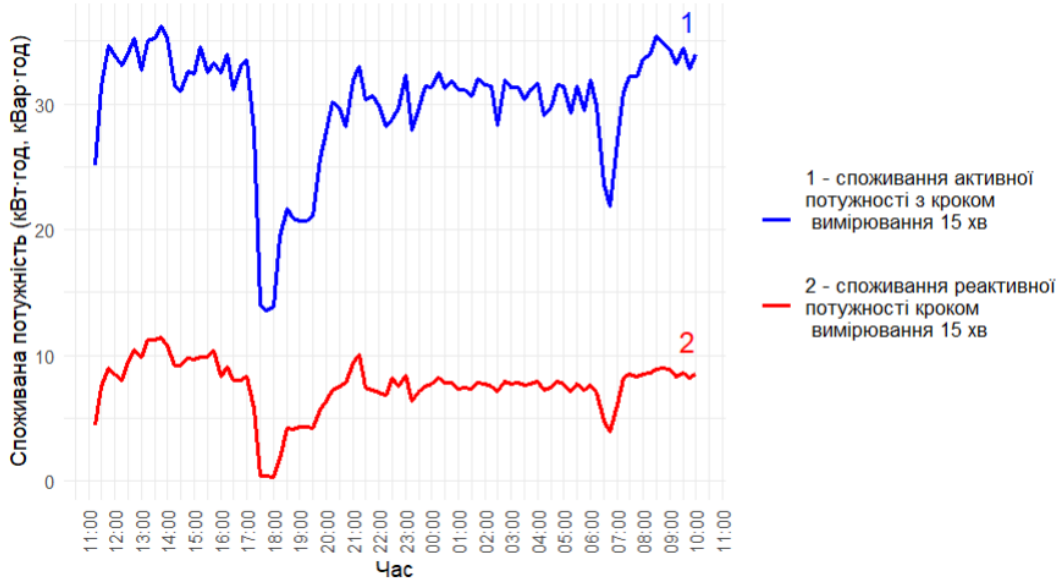


Рис.2 Добовий графік споживання потужностей з кроком усереднення 15 хв.

Розбіжності даних потужностей від кроку усереднення приведено на рис. 3.

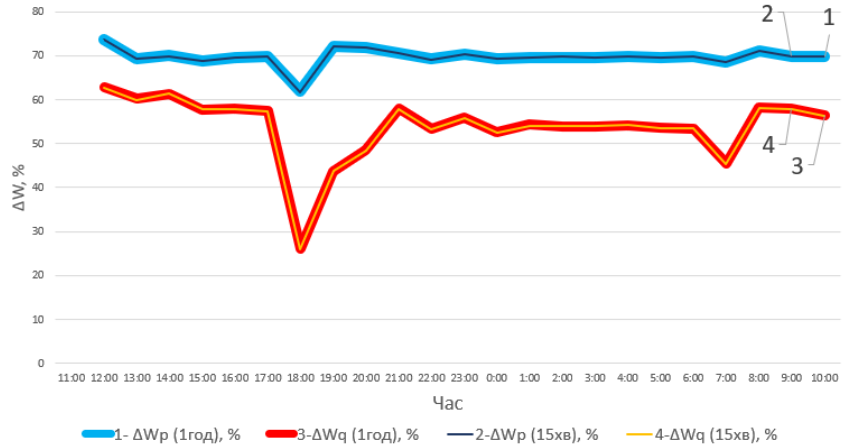


Рис. 3 – Графіки порівняння розбіжності ΔWp та ΔWq при для кроках усереднення 1 год та 15 хв.

Дані порівняльного аналізу графіків, рис.3, розбіжність становить 0,1% для активної та 0,2% для реактивної енергії, що вкладається в межі класу точності приладів обліків і підкреслює їх достовірність.

Перелік джерел посилань

1. ДСТУ EN 50470-1:2010. Засоби вимірювання електричної енергії змінного струму. Частина 1. Загальні вимоги, випробування та умови випробування. Засоби обліку (EN 50470-1:2006, IDT). — Київ: Держспоживстандарт України, 2012.
2. Антипов Є. О., Кривоносов В. Є., Петренко А. В., Іванченко А. В., Босенко О. А. (2024). Оцінка достовірності технічного обліку електроенергії підприємства. Енергетика і автоматика, (5), 40–52.

УДК 631.53:628.9:004.8

СМАРТ-ТЕХНОЛОГІЇ У СВІТЛОКУЛЬТУРІ РОСЛИН

Червінський Л.С, д.т.н., професор, Окушко О.В., к.т.н., доцент, Радько І.П., к.т.н., доцент

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Світлокультура рослин є перспективним напрямом розвитку сучасного рослинництва, що передбачає використання штучних джерел світла для забезпечення необхідних умов фотосинтезу та регулювання процесів росту й розвитку рослин. Актуальність досліджень у цій галузі зумовлена необхідністю підвищення продуктивності рослин, раціонального використання енергетичних ресурсів і впровадження інтелектуальних систем керування технологічними процесами вирощування сільськогосподарських культур [1, 2].

Одним із перспективних напрямів удосконалення світлокультури є застосування смарт-технологій, які забезпечують автоматизований моніторинг параметрів світлового середовища та адаптивне керування режимами опромінення. Основу таких систем становлять світлодіодні світильники з можливістю регулювання інтенсивності й спектрального складу випромінювання, сенсори освітленості, температури та вологості, мікроконтролери, а також програмні засоби оброблення інформації. Використання цих компонентів дає змогу формувати оптимальні умови

вирощування рослин з урахуванням їхніх біологічних особливостей і стадій розвитку.

Важливим показником світлового режиму є фотосинтетично активна радіація (ФАР), яка охоплює діапазон довжин хвиль приблизно 400–700 нм. Для кількісного оцінювання освітлення рослин використовують густину потоку фотосинтетичних фотонів (PPFD), що вимірюється в мкмоль/(м²·с), та добовий інтеграл світла (DLI), який характеризує сумарну кількість фотонів, що надходять на одиницю площі протягом доби. У роботі [1] розглянуто особливості використання світлодіодних технологій для підвищення продуктивності рослин і регулювання їхніх фізіологічних процесів. Показано, що застосування світлодіодних джерел випромінювання створює можливості для керування спектральними характеристиками світла відповідно до потреб конкретної культури.

Спектральний склад випромінювання суттєво впливає на фотосинтез, морфогенез і формування біомаси рослин. Синя складова спектра бере участь у регуляції розвитку листкового апарату та морфологічних характеристик рослин, тоді як червоне світло має важливе значення для фотосинтетичних процесів і фоторецепторної регуляції росту. Додавання далекого червоного випромінювання може впливати на видовження стебел, формування листків і реакції рослин на світлове оточення. У дослідженні [2] узагальнено сучасні досягнення у сфері застосування світлодіодного освітлення в садівництві та визначено перспективи оптимізації спектральних параметрів для різних технологій вирощування. Водночас ефективність конкретного спектрального режиму залежить від виду рослин, сорту, фази розвитку та умов культивування.

Особливе значення має інтеграція систем освітлення з інтелектуальними засобами моніторингу та керування. За допомогою сенсорів система визначає фактичну інтенсивність освітлення, температуру й вологість повітря, після чого контролер коригує потужність світлодіодних світильників відповідно до заданих технологічних параметрів. За наявності природного освітлення можна автоматично зменшувати інтенсивність штучного світла, підтримуючи необхідний рівень PPFD та знижуючи споживання електроенергії. Такий підхід дає змогу перейти від використання фіксованих режимів освітлення до адаптивного керування світловим середовищем.

Перспективним напрямом розвитку смарт-технологій є застосування штучного інтелекту та комп’ютерного зору для оцінювання фізіологічного стану рослин. Аналіз цифрових зображень дає змогу визначати площу листкової поверхні, оцінювати зміни забарвлення, відстежувати темпи росту та виявляти ознаки стресових реакцій. Поєднання цих даних із показниками мікроклімату й параметрами освітлення створює передумови для розроблення прогнозних моделей росту рослин та автоматичного вибору режимів опромінення. У роботі [3] розглянуто можливості підвищення енергоефективності світлодіодних систем на основі оптимізації їхніх характеристик і режимів використання.

Таким чином, застосування смарт-технологій у світлокультурі рослин є перспективним засобом підвищення ефективності контрольованого рослинництва. Подальші дослідження доцільно спрямувати на розроблення

інтелектуальних систем керування спектральним складом та інтенсивністю опромінення, експериментальне визначення оптимальних світлових режимів для окремих культур і оцінювання енергетичної ефективності автоматизованих електротехнологічних комплексів.

Перелік джерел посилань

1. Massa G. D., Kim H.-H., Wheeler R. M., Mitchell C. A. Plant productivity in response to LED lighting. *HortScience*. 2008. Vol. 43, No. 7. P. 1951–1956. DOI: https://doi.org/10.21273/HORTSCI.43.7.1951.
2. Bantis F., Smirnakou S., Ouzounis T., Koukounaras A., Ntagkas N., Radoglou K. Current status and recent achievements in the field of horticulture with the use of light-emitting diodes (LEDs). *Scientia Horticulturae*. 2018. Vol. 235. P. 437–451. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.02.058.
3. Kusuma P., Pattison P. M., Bugbee B. From physics to fixtures to food: current and potential LED efficacy. *Horticulture Research*. 2020. Vol. 7. Article 56. DOI: https://doi.org/10.1038/s41438-020-0283-7.

УДК 621.311.287

ОПТИМІЗАЦІЯ ІНТЕГРАЦІЇ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНИХ ДЖЕРЕЛ ГЕНЕРАЦІЇ В СИСТЕМИ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КРИТИЧНИХ ОБ'ЄКТІВ З УРАХУВАННЯМ МІЖНАРОДНОГО ДОСВІДУ

аспірант, Поліщук Р.Ф. д.т.н., проф. Шворов С.А.
Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

Забезпечення стійкості об'єктів критичної інфраструктури (ОКІ) в умовах зовнішніх дестабілізуючих факторів вимагає впровадження інноваційних технологій розподіленої генерації. Світовий досвід, зокрема технологічні підходи Японії у сфері побудови автономних мікромереж (*Microgrid*) та високоефективних систем накопичення енергії після масштабних енергетичних криз, доводить високу ефективність децентралізованих енергокомплексів для гарантованого живлення стратегічних об'єктів.

Основною метою роботи є розробка оптимізаційних моделей інтеграції децентралізованих джерел генерації (ДДГ) для підвищення стійкості енергозабезпечення ОКІ з урахуванням передових міжнародних практик.

У межах дослідження удосконалено критерій стійкості системи енергопостачання з урахуванням стохастичного характеру відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Запропоновано алгоритм оптимізації параметрів гібридних енергокомплексів, який базується на принципах балансування навантажень і керування накопичувачами енергії (аналогічно до японських систем управління розподіленими енергоресурсами). Це дозволяє забезпечити стійке функціонування критичних споживачів у разі аварійного відключення основного живлення в острівному режимі (island mode).

Запропоновані оптимізаційні моделі та алгоритми диспетчеризації дозволяють визначати раціональні співвідношення встановлених потужностей ДДГ та ємності накопичувачів для гарантованого покриття навантажень першої

категорії надійності. Це мінімізує ризики повного знеструмлення стратегічних об'єктів (за аналогією до передових світових практик побудови стійких мікромереж, зокрема в Японії), знижує експлуатаційні витрати на резервне паливо та підвищує загальну надійність енергосистеми в умовах надзвичайних ситуацій.

Перелік джерел посилань

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. Vol. 264. Art. 114726.
2. Paul S., Poudyal A., Poudel S., Dubey A., Wang Z. Resilience assessment and planning in power distribution systems: Past and future considerations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2024. Vol. 189. Art. 113991.
3. Marnay C., Aki H., Hirose K., Kwasinski A., Ogura S., Shinji T. Japan's Pivot to Resilience: How Two Microgrids Fared After the 2011 Earthquake. *IEEE Power and Energy Magazine*. 2015. Vol. 13, No. 3. P. 44–57.

УДК 621.313.8: 631.53.027

ВПЛИВ МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА ПОСІВНІ ЯКОСТІ НАСІННЯ ТЕХНІЧНИХ КУЛЬТУР

Савченко В.В., к.т.н., доцент; Демидко В. Ю., студент магістратури
Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

Хоча багатьма дослідниками встановлено позитивний вплив магнітного поля на насіння сільськогосподарських культур, але відсутність пояснення дії магнітного поля на процеси, які відбуваються в насінині, не дозволяє встановити всі діючі фактори при магнітній обробці насіння і визначити їх оптимальні значення.

Механізм дії магнітного поля на насіння можна пояснити так. Під дією магнітного поля зростає швидкість хімічних та біохімічних реакцій [1], які є переважно окислювально-відновними. Внаслідок цього збільшується концентрація продуктів реакції і відбувається стимуляція насіння.

При цьому підвищується розчинність солей і кислот, що знаходяться в рослинній клітині.

Зміна швидкості хімічних та біохімічних реакції, які протікають у рослинній клітині, а також розчинності солей впливає на біопотенціал і pH середовища.

Під впливом магнітного поля внаслідок дії сили Лоренца посилюється транспорт іонів через клітинну мембрану, збільшуючи концентрацію мінеральних речовин у клітині, які беруть участь у хімічних реакціях [1]:

$$\Delta C_{i_2} = C_{i_1} f_i l_i \frac{\varphi}{L}(a + 2K_m B/\tau)(a + 2K_m B/\tau + K_к K_b Bv) e^{\frac{m(K_i^2 B^2 + 2K_i Bv)}{2RT}}, \quad (1)$$

де C_{i1}, C_{i2} – концентрації речовин у рослинних клітинах, розділених мембраною, моль/л; l_i – шлях руху іона в магнітному полі, м; φ – дифузійний

потенціал, В; L – товщина мембрани, м; a – розмір пори в мембрані, м; K_m, K_b, K_i – коефіцієнти; τ – полюсна поділка, м.

Магнітне поле сприяє прискоренню дифузії молекул через клітинну мембрану. Зміна концентрації речовини, яка пройшла шляхом дифузії через мембрану, визначається рівнянням [1]:

$$\Delta C = \frac{C_1 - C_2}{2}\left(1 - e^{-\frac{2k_\partial (a + K_m B/\tau)^2 e^{-\frac{E_a}{kT}}}{L^2} t}\right), \quad (2)$$

де k_∂ – коефіцієнт, $с^{-1}$, E_a – енергія активації дифузії, Дж; k – стала Больцмана, Дж/К.

Зростання проникності мембрани та розчинності кисню при магнітній обробці призводить до зростання його концентрації в клітині, що придушує процес спороутворення фітопатогенних грибків.

Під дією магнітного поля прискорюється транспорт води в клітину. Оскільки при магнітній обробці насіння зростає проникність мембран, тому зростає також і водопоглинання.

На підставі отриманих аналітичних виразів встановлено, що зміна pH, біопотенциалу, ступеня електролітичної дисоціації, водопоглинання, концентрації кисню і іонів в клітині рослини залежить від квадрата магнітної індукції і швидкості руху насіння в магнітному полі.

Експериментальні дослідження впливу магнітного поля на енергію проростання і схожість насіння олійних культур проводили з насінням льону сорту «Гладіатор». При дослідженнях використовувався ортогональний центрально-композиційний план. Значення нижнього, основного і верхнього, рівня становили для магнітної індукції 0, 0,065 і 0,13 Тл, для швидкості руху насіння – 0,4, 0,6 і 0,8 м/с.

Насіння переміщали через магнітне поле, створюване чотирма парами постійних магнітів з інтерметалічного композиту NdFeB, встановленими паралельно над і під стрічкою транспортера зі змінною полярністю. Магнітну індукцію регулювали зміною відстані між магнітами і вимірювали тесламетром 43205/1..

Енергію проростання і схожість насіння визначали за ГОСТ 12038-84.

У діапазоні магнітної індукції 0 – 0,065 Тл із її зростанням збільшується енергія проростання і схожість насіння льону. При магнітній індукції понад 0,065 Тл енергія проростання і схожість насіння льону зменшуються, але є вищими за контроль. При магнітній індукції понад 0,13 Тл ці показники змінюють мало із зростанням магнітної індукції, а при магнітній індукції 0,3 Тл несуттєво перевищують контроль.

Ефект магнітної обробки залежав від швидкості руху насіння, але вона є менш істотним фактором, ніж магнітна індукція.

На основі проведених досліджень встановлено, що при передпосівній обробці насіння льону в магнітному полі енергія проростання насіння та його схожість були найбільшими при магнітній індукції 0,065 Тл, чотириразовому перемагнічуванні, градієнті магнітного поля 0, 57 Тл/м і швидкості руху насіння 0,4 м/с. За такого режиму обробки енергія проростання насіння льону збільшувалася на 30 %, схожість – на 26 %.

Перелік джерел посилань

1. Kozyrskyi V., Savchenko V., Sinyavsky O. Presowing Processing of Seeds in Magnetic Field. Handbook of Research on Renewable Energy and Electric Resources for Sustainable Rural Development. IGI Global, 2018. P. 576 – 620.
2. Kozyrskyi V., Savchenko V., Sinyavsky O. Effect of magnetic field on ion transport in plant cells. Research in Agricaltural Electric Engineering. 2014. Vol.2, №3. P. 90 – 94.

УДК 621.327.539

АВТОМАТИЧНЕ КЕРУВАННЯ ДОЗУВАННЯМ СОКОВИТИХ КОРМІВ

Савченко В.В., к.т.н., доцент; Санченко О.В., к.т.н., доцент; Лось Я.О., студент магістратури

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

Загальним недоліком кормоцехів на базі змішувачів неперервної дії є велика нерівномірність видачі соковитих кормів, що в значній мірі обумовлюється якістю кінцевої суміші та призводить до неоправданих втрат кормів [1].

Це пояснюється тим, що регулювання та комутація потоків компонентів здійснюються вручну на основі візуальних спостережень, а використовуване об’ємне дозування не забезпечує ефективного формування потоків компонентів сумішей. Відсутні засоби вимірювання витрати кормів у неперервному потоці.

Найперспективнішим для побудови систем автоматичного керування, як показав проведений аналіз, є НВЧ-метод вимірювання.

При зондуванні подрібнених соковито-зелених кормів у висному стані у вільному просторі електромагнітними НВЧ-хвилями послаблення випромінюваної енергії в кормі визначається в основному вологою, яка міститься в ньому. Це фізично обумовлене переважанням в НВЧ-діапазоні діелектричних втрат у волозі. Тому маса вологи $m_в$, яка міститься в оцінюваному об’ємі корму, визначається за ослабленням випромінюваної НВЧ- енергії, яке визначається шляхом безперевного контролю потужностей випроміненого $P_в$, зворотно відбитого $P_з$ та пропущеного $P_{пр}$ НВЧ-випромінювань:

$$m_в = k_в \lg \frac{P_в - P_з}{P_{пр}}. \quad (1)$$

Тому для виключення впливу на результат вимірювання співвідношення вологи та сухої речовини в кормі, додатково контролюється його вологість *W*. Для цього використовується метод відбитої НВЧ-потужності в поєднанні з багато параметричним принципом розподілу інформаційного сигналу та завад.

За частототами НВЧ-випрмінювання компенсується зміна густини потоку, а за кутами його зондування – коливання шорскості відбитої поверхні. При цьому перша частота f_1 вибрана в довгохвильовій області, де максимальна чутливість методу відбитої потужності до вологості та менша до густини та шорсткості, а друга частота f_2 із протилежних умов вибрана в короткохвильовій області НВЧ-діапазону. Вологість подрібненого корму контролюється за різницею зворотніх втрат потужності НВЧ-випромінювань на цих частотах:

$$W = k_w \left[\lg \frac{P_{31}}{P_{d1}} - \lg \frac{P_{32}}{P_{d2}} \right]. \quad (2)$$

Знаючи масу вологи $m_в$, яка міститься у оціночному об'ємі потока корму, та його вологість W, можна однозначно визначити за їхнім співвідношенням масу соковитого корму:

$$m_к = \frac{m_в}{W}. \quad (3)$$

Швидкість потоку подрібненого корму контролюється вимірюванням доплеровського зміщення f_d частоти відбитої хвилі відносно падаючої при зондуванні потоку НВЧ-випромінювання під гострим кутом α_d до напряму руху:

$$v = k_v f_d \frac{3 \cdot 10^{-6}}{f_2 \cos \alpha_d}. \quad (4)$$

Отримані параметри дають можливість безконтактно контролювати масову витрату Q подрібненого корму в безперевному потоці:

$$Q = kmW^{-1}v. \quad (5)$$

Функціонально НВЧ-витратомір складається з трьох вимірювальних каналів: вимірювача маси вологи, двочастотного вологоміра та доплеровського вимірювача швидкості потоку корму, сигнали від яких оброблюються відповідно до встановлених функцій перетворення в спеціально розробленому обчислювальному блоці, в якому поряд з цифровою реєстрацією інтегральної витрати корму та аналоговим виходом сигналу миттєвової витрати передбачене клавіатурне програмування завдання дози корми з видачею після його накопичення керуючого сигналу.

Система електрообладнання подрібнювача ИКС-5М складається з електропривода подрібнювача та регульованого електропривода шнека.

Витрата кормів вимірюються НВЧ-витратоміром на виході подрібнювача. Сигнал з витратоміра поступає в пристрій порівняння частотного регулятора, який виробляє сигнали керування асинхронним двигуном , який змінює швидкість руху шнека, відповідно і подачу коренебульбоплодів на подрібнювальний барабан.

Привод шнека подрібнювача ИКС-5М виконаний на базі регульованого електропривода з перетворювачем частоти VFD015E43A [2] для двигуна потужністю 1,5 кВт.

Розроблене електрообладнання забезпечує стабілізацію на заданому рівні витрати кормів та струмів навантаження електродвигуна з нерівномірністю, яка не перевищує 15 % за коефіцієнтом варіації. Це дає можливість підвищити на 15 – 25

% продуктивність і відповідно знизити на 15 – 25 % питому енергоємність подрібнення коренебульбоплодів.

Перелік джерел посилань

Ревенко І.І., Щербак В. М. Механізація тваринництва. К.: Вища освіта, 2004. 319 с.
Перетворювач частоти Delta Electronics, 2,2 кВт Режим доступу: https://deltaww.com.ua/vfd022el43a-preobrazovatel-chastoty-22kw-380v-vfd022el43a

УДК 621.313.8: 631.53.027

ОБРОБКА ЖИВИЛЬНИХ РОЗЧИНІВ У ПОЛІ КОРОННОГО РОЗРЯДУ

Синявський О. Ю., к.т.н., доцент; Богославець О. Р., студент магістратури
Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна.

Підвищення ефективності тепличного овочівництва пов’язане з переходом до енерго- та ресурсозберігаючих технологій вирощування рослин при використанні малооб’ємних субстратів або на штучно створеному середовищі живлення без субстрату, а також застосуванні електротехнологій.

Експериментальними дослідженнями встановлено, що поливання рослин активованою водою, обробленою в магнітному полі, електричним струмом, заморожуванням і розморожуванням дає певний ефект, пов’язаний із збільшенням урожайності [1]. При цьому покращується використання мінеральних добрив..

Мета дослідження – встановлення впливу поля коронного розряду на параметри живильних розчинів.

Експериментальні дослідження із впливу поля коронного розряду на живильний розчин проводили на експериментальній установці, яка складається з автотрансформатора, блока підвищувального трансформатора, двопівперіодної схеми множення напруги, кіловольтметра електростатичної системи, осцилографа з під´єднаною рамковою антеною, тримача коронуючих електродів та некоронуючого електрода.

Визначені зміни pH та окислювально-відновного потенціалу (ОВП) живильного розчину при її обробці в полі коронного розряду протягом 1, 2 і 3 хвилин (відстань між коронуючим електродом і площиною 3 см), які показали, що збільшення напруги і часу обробки призводить до зростання pH розчину, а ОВП при цьому зменшується. Збільшення відстані між коронуючим електродом і площиною призводить до зменшення ефекту електричної обробки розчину при незмінній напрузі, тобто збільшення відстані між коронуючим електродом і площиною вимагає підвищення напруги, щоб отримати такі ж зміни pH та ОВП, як і при менших відстанях між електродом і площиною.

Досліди проводили як при електропровідному дні жолоба, в якому оброблялася розчин, так і неелектропровідному. При цьому різниці у зміні pH та ОВП не зафіксовано. Це підтверджує те, що причиною зміни параметрів розчину є потік аероіонів, які рухаючись за силовими лініями електричного поля, дифундують у водний розчин. Зміна товщини шару розчину також не суттєво

впливає на ефект обробки, оскільки він залежить згідно з теоретичними дослідженнями лише від товщини дифузійного шару.

Зміна pH обробленого розчину в полі коронного розряду в часі зростає до певної величини, після чого зменшується, наближуючись до pH необробленого.

Дослідження впливу обробки живильного розчину в полі коронного розряду на ріст і розвиток рослин проводилися у відповідності із методикою польового досліду [2].

Досліди проводилися з огірками гібриду “Топольок”. При цьому вони проводилися за такою схемою:

1-й варіант (контрольний) – рослини вирощують на необробленому розчині;

2-й варіант – рослини вирощують на розчині, обробленим у полі коронного розряду.

Живильний розчин оброблювали в полі коронного розряду при напрузі на коронуючому електроді 15,5 кВ, відстані між ним і площиною 3 см, між коронючими електродами – 5 см, часі обробки 1 хв.

Досліди проводилися в гідропонній теплиці, обладнаній краплинною системою поливання. Дослідні ділянки, площею 8 м^2, розміщували методом звичайних повторень. Досліди проводилися в чотирикратній повторності.

У результаті проведених досліджень встановлено, що обробка живильного розчину в полі коронного розряду позитивно впливає на ріст і розвиток рослин. При цьому прискорюється їх ріст, причому перевищення в рості стає більш помітним та статистично значущим в період появи третього листка, початку цвітіння і плодоношення та складає відповідно 10,25, 15 і 17 см.

При обробці живильного розчину в полі коронного розряду підвищується урожайність овочевих культур. Урожайність огірків при існуючій технології вирощування склала 26,8 кг/м^2, а при обробці живильного розчину в полі коронного розряду – 30,7 кг/м^2, тобто урожайність підвищилася на 14,7 %.

Висновок. На основі проведених досліджень можна зробити висновок, що оптимальним режимом обробки живильного розчину в полі коронного розряду є напруга 15,5 кВ при відстані між коронуючим електродом і площиною 3 см. Відстань між електродами згідно з дослідженнями Г.М. Борща повинна становити 5 см. Час обробки води – 1 хв, оскільки при більших експозиціях ефект обробки змінюється несуттєво.

За такого режиму обробки живильного розчину врожайність огірків підвищилася на 14,7 %.

Перелік джерел посилань

1. Ковалевський, С.В.; Сокур, С.В. Застосування коронного розряду у технологіях. Вісник ЖДТУ. 2011. № 3 (58). С. 56 – 58.

2. Рожков А. О., Пузік В. К., Каленська С. М., Пузік Л. М., Попов С. І., Музафаров Н. М., Бухало В. Я., Криштоп Є. А. Дослідна справа в агрономії: навч. посібник: у 2 кн. Кн. 1. Теоретичні аспекти дослідної справи; за ред. А. О. Рожкова. Х.: Майдан, 2016. 316 с.

УДК 621.327.539

СВІТЛОДІОДНА СИСТЕМА ОПРОМІНЕННЯ РОСЛИН У ЗИМОВІЙ ТЕПЛИЦІ

Синявський О. Ю., к.т.н., доцент; Бузаєва А.А., студентка магістратури

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна.

Важливим фактором навколишнього середовища для росту рослин є світло, під дією якого виконується процес фотосинтезу. Зимою і ранньою весною використовують штучне електричне досвічування, яке скорочує час вирощування розсади на 25 – 30 днів і підвищує урожайність на 25 – 30 % [1].

Більшість тепличних господарств використовують для опромінення рослин натрієві лампи високого і низького тиску та металогалогенні лампи ДРИ. При цьому споживана потужність на квадратний метр досягає 125 Вт. Спектр натрієвих ламп лише частково замінює природний спектр, необхідний для росту і розвитку рослин.

Науково і практично доведено, що для освітлення рослин можна використовувати джерела світла на основі світлодіодів різного кольору свічення. Для створення широкосмугової системи освітлення на основі кольорових світлодіодів буда вибрана чотириколірна система, яка складається з таких світлодіодів: УФ 400 нм, Синій 470 нм, Зелений 525 нм, Оранжевий 600 нм.

Для світлодіодного освітлення із змінним спектром випромінювання потрібне застосування великого числа живлячих проводів для кожного кольору окремо або складна і дорога система управління.

Застосування резонансної системи електроживлення джерел світла дозволяє позбутися від великої кількості проводів. Резонансна система живлення складається з перетворювача напруги, лінії електропередачі і зворотного перетворювача, до складу якого входить трансформатор і випрямляч

Заміна діючої системи опромінення на основі ламп ДНаЗ на світлодіодну дає можливість отримати річний економічний ефект в одному блоці 416 тис. грн, а термін окупності нової системи становить 1,7 року.

Перелік джерел посилань

1. Батуєва Є.Д., Авксентьєва О.О. Регуляція селективним світлом мітотичної активності кореневих меристем та ростових процесів проростків сої культурної з контрастною фотоперіодичною реакцією. Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Серія «Біологія», 2022, 38, 53– 61. https://doi.org/10.26565/2075-5457-2022-38-6.

2. Жмурко В.В, Авксентьєва О.О, Батуєва Є.Д. Фотоморфогенез та вміст вуглеводів в осьових органах проростків гороху посівного за дії селективного світла. Біофізичний вісник. 2022;47:27–39. https://doi.org/10.26565/2075-3810-2022-47-03

УДК 636.2:621.383.51

РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ ІНФРАЧЕРВОНОГО ОБІГРІВУ ТЕЛЯТ

Червінський Л.С. д.т.н., професор;, Швиденко І.В., магістр

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна.

Підвищення ефективності вирощування молодняку великої рогатої худоби значною мірою залежить від створення оптимальних параметрів мікроклімату в тваринницьких приміщеннях. Особливо важливим є забезпечення належних температурних умов для телят у ранній період їхнього життя, оскільки недостатній рівень теплового комфорту може спричиняти збільшення енергетичних витрат організму на підтримання температурного гомеостазу, погіршення умов утримання та зниження продуктивності тварин. Тому розроблення енергоефективних систем локального обігріву телят є актуальним науково-практичним завданням.

Одним із перспективних напрямів удосконалення систем обігріву молодняку великої рогатої худоби є застосування інфрачервоного випромінювання. На відміну від традиційних систем загального обігріву приміщень, інфрачервоні нагрівальні пристрої забезпечують передавання енергії безпосередньо до поверхонь, що перебувають у зоні опромінення. Поглинута енергія перетворюється на теплоту, завдяки чому створюються умови для локального обігріву тварин без необхідності підтримувати однаково високу температуру в усьому об'ємі приміщення. Це дає змогу розглядати інфрачервоне опромінення як один із можливих способів зниження витрат електроенергії на забезпечення теплового комфорту телят.

Ефективність інфрачервоного обігріву визначається спектральними характеристиками випромінювача, його електричною потужністю, висотою встановлення, тривалістю роботи, площею опромінюваної поверхні та температурою навколишнього середовища. Важливе значення мають також теплоізоляційні характеристики огороджувальних конструкцій телятника, кратність повітрообміну та швидкість руху повітря. За недостатньої теплоізоляції приміщення та інтенсивного повітрообміну тепловтрати можуть істотно зростати, що необхідно враховувати під час проєктування системи.

Розроблення електротехнологічного обладнання для інфрачервоного обігріву передбачає визначення необхідної теплової потужності, вибір типу випромінювачів, обґрунтування їхнього розміщення та формування системи автоматичного керування. Для підвищення енергоефективності доцільно використовувати температурні датчики, контролер і силові комутаційні пристрої, які забезпечуватимуть регулювання роботи нагрівачів залежно від фактичних температурних умов у зоні перебування телят. Такий підхід дає змогу реалізувати диференційоване керування теплопостачанням і запобігати надмірному нагріванню окремих ділянок.

Метою роботи є розроблення системи інфрачервоного опромінення телят, яка забезпечує формування необхідних температурних умов у локальній зоні

утримання, раціональне використання електричної енергії та автоматизоване регулювання теплового режиму залежно від параметрів мікроклімату.

Для досягнення поставленої мети передбачено визначення теплового балансу приміщення телятника, оцінювання тепловтрат через огороджувальні конструкції та систему вентиляції, обґрунтування потужності інфрачервоних випромінювачів і вибір їхнього розташування відносно місць утримання тварин. Окрему увагу приділено розробленню алгоритму автоматичного керування, який передбачає контроль температури в зоні перебування телят, увімкнення та вимкнення нагрівальних елементів відповідно до заданих параметрів і забезпечення захисту від перегрівання.

Запропонований підхід до побудови системи передбачає використання інфрачервоних випромінювачів, температурних датчиків, блока керування та силового комутаційного обладнання. Система повинна забезпечувати підтримання заданих температурних умов у зоні обігріву з урахуванням віку телят, температури навколишнього середовища та теплових характеристик приміщення. Для перевірки її працездатності доцільно застосовувати математичне моделювання теплових потоків і температурного поля, а також експериментальне оцінювання температури повітря та поверхонь у зоні перебування тварин.

Очікуваним результатом розроблення є створення технічно обґрунтованої системи локального інфрачервоного обігріву телят, яка забезпечуватиме можливість автоматичного регулювання теплового навантаження відповідно до фактичних умов утримання. Практичне використання такої системи може сприяти підвищенню енергоефективності обігріву, зменшенню непродуктивних тепловтрат і поліпшенню умов утримання молодняку великої рогатої худоби. Кількісне підтвердження цих переваг потребує проведення розрахункових та експериментальних досліджень.

Перелік джерел посилань

1. Сколоздра С. В., Чайковський Б. П., Лецик О. С. Розрахунок, вибір і контроль режиму інфрачервоного обігріву молодняка. *Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Ґжицького*. 2010. Т. 12, № 2(2). С. 274–279.
2. Gebremedhin K. G., Wu B. A model of evaporative cooling of wet skin surface and fur layer. *Journal of Thermal Biology*. 2002. Vol. 27, No. 7. P. 565–572.
3. Gebremedhin K. G., Cramer C. O., Porter W. P. Predictions and measurements of heat production and food and water requirements of Holstein calves. *Transactions of the ASAE*. 1983. Vol. 26, No. 3. P. 715–720.
4. Indoor Thermal Comfort Sector: A Review of Detection and Control Methods for Thermal Environment in Livestock Buildings. *Sustainability*. 2024. Vol. 16, no. 4. Art. 1662. DOI: https://doi.org/10.3390/su16041662

УДК 621.311

ОЦІНКА МАНЕВРЕНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ТЕЦ В ПЕРІОД ПІСЛЯВОЄННОЇ ВІДБУДОВИ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ГРАФІКІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ОЕС УКРАЇНИ

Щербина Є.В., к.т.н.; Тесленко О.І., к.т.н., ст. досл.

Інститут загальної енергетики НАН України, м. Київ, Україна.

Забезпечення гнучкості ОЕС України завжди було актуальною проблемою, яка зі значним зростанням частки негарантованої генерації електроенергії з відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) стала ще більш вагомою. Одним з основних напрямів підвищення гнучкості енергосистеми є підвищення маневреності джерел генерації на викопному паливі. В сучасних умовах повномасштабної російської агресії проблема маневреності теплової генерації загострилась внаслідок значних руйнувань енергетичної інфраструктури, насамперед вугільних ТЕС, які традиційно виконували функції маневреної генерації. Тому підвищення маневреної здатності ТЕЦ, як одного з важливих технологічних інструментів забезпечення гнучкості ОЕС України в умовах воєнних ризиків та у період післявоєнного відновлення, стає першочерговим завданням при технологічній трансформації енергосистеми для забезпечення стійкого електропостачання, особливо при значному зростанні частки генерації з ВДЕ [1]. Враховуючи погодинну, добову та сезонну стохастичність виробництва СЕС та ВЕС постає задача аналізу тенденцій сезонних змін добових ГЕН в енергосистемі та їх покриття всіма типами генерації з урахуванням негарантованого виробництва електроенергії ВДЕ та використанням маневрених потужностей ТЕС і ТЕЦ у довоєнний період. Метою такого аналізу є прогнозування необхідного для підвищення гнучкості енергосистеми маневреного потенціалу ТЕЦ в умовах значного руйнування під час війни вугільних ТЕС. Для цього досліджено добові графіки електричних навантажень у різні сезони року, їх максимальні і мінімальні значення, та визначено структуру потужності покриття цих навантажень різними технологіями генерації. Також визначені добові розмахи потужності для кожної технології, зроблено аналіз їх сезонних змін та виявлена залежність об'єднаних розмахів потужностей теплової генерації ТЕЦ і ТЕС від об'єднаних розмахів потужностей сонячної та вітрової генерації протягом року.

Аналіз добових ГЕН та їх покриття різними типами генерації, зокрема структури покриття максимальних та мінімальних значень, проведено на ретроспективних погодинних показниках навантаження ОЕС України та потужностей їх покриття у 2021 році за даними НЕК «Укренерго». Для оцінки динаміки сезонних змін добових ГЕН аналіз проведено для зимового, весняного, літнього і осіннього сезонів. Для кожного сезону досліджено добові графіки протягом 10-ти діб навколо визначених характерних дат змін тривалості світлового дня чотирьох сезонів року – зимове і літнє сонцестояння (відповідно найкоротший і найдовший світловий день), весняне і осіннє рівнодення. Перша частина дослідження полягала у пошуку максимальних P_{max}^{it} та мінімальних P_{min}^{it} значень погодинних навантажень протягом доби для десяти обраних діб (t = 1,10)

кожного з чотирьох сезонів року $i \in$I (I – множина сезонів року) і наступному аналізі структури покриття цих навантажень різними типами потужностей генерації $g \in$G (G – множина типів генерації). З метою аналізу та оцінки сезонних змін добових максимальних і мінімальних навантажень енергосистеми визначаються їх середні значення $\bar{P}^i_{max}$ і $\bar{P}^i_{min}$.

Друга частина дослідження полягала у визначенні розмахів потужностей R^{it}_g (різниця між максимальним та мінімальним значеннями) кожної технології генерації $g \in$G при покритті добових навантажень у вибрані дати сезонів року та їх середніх значень $\bar{R}^i_g$. Для аналізу маневрового потенціалу кожної технології генерації електроенергії визначаються співвідношення середніх значень розмахів потужностей різних технологій генерації при покритті добових ГЕН до середніх значень добових максимальних навантажень енергосистеми у обрані періоди сезонів року. В результаті дослідження була визначена кореляційна залежність між об'єднаними розмахами ТЕЦ і ТЕС та об'єднаними розмахами СЕС та ВЕС протягом року. Вона має лінійний характер і описується наступною формулою:

$$\bar{R}_{\text{ТЕС,ТЕЦ}} = 2{,}3535\ \bar{R}_{\text{СЕС,ВЕС}} - 649{,}44.$$

Коефіцієнт кореляції Пірсона [2] дорівнює 0,995, що означає майже ідеальний прямий лінійний зв'язок між цими двома змінними і свідчить про те, що вони змінюються практично синхронно. Таким чином, проведене дослідження спрямоване на формування кількісного уявлення про те, як зміни генерації ВДЕ трансформують добовий графік необхідної роботи ТЕС і ТЕЦ, визначаючи величину, часову структуру та інтенсивність розмахів їхньої потужності, необхідних для надійного покриття електричного навантаження.

Перелік джерел посилань

1. Бабак, В., Нікітін, Є., Тесленко, О. (2024). Цілісний підхід до системної трансформації електроенергетики, централізованого теплопостачання та комунальної інфраструктури. *Системні дослідження в енергетиці*, 2024, 4 (80), 6–25. https://doi.org/10.15407/srenergy2024.04.006
2. Коефіцієнт кореляції Пірсона. (2026, жовтня 8). *Вікіпедія*. https://uk.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%9A%D0%BE%D0%B5%D1%84%D1%96%D1%86%D1%96%D1%94%D0%BD%D1%82_%D0%BA%D0%BE%D1%80%D0%B5%D0%BB%D1%8F%D1%86%D1%96%D1%97_%D0%9F%D1%96%D1%80%D1%81%D0%BE%D0%BD%D0%B0&oldid=48948394 (дата звернення 9 листопада 2026р.)

УДК 631.24.243

ЦИФРОВИЙ ЕНЕРГОМОНІТОРИНГ І ПРОГНОЗУВАННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ В СИСТЕМІ SMART CAMPUS

Наливайко В. А., к.т.н., доцент; Радько І.П., к.т.н., доцент; Окушко В. О., к.т.н., доцент; Червінський Л. С., д.т.н., професор

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

Підвищення енергоефективності закладів вищої освіти потребує впровадження цифрових технологій контролю, аналізу та прогнозування

використання енергоресурсів. Навчальні корпуси та гуртожитки характеризуються змінними режимами експлуатації, залежністю навантажень від розкладу занять, кількості користувачів і погодних умов. Традиційний облік не завжди забезпечує оперативне виявлення перевитрат та неефективних режимів роботи інженерних систем.

У НУБіП України впроваджено автоматизовану систему збору енергетичних даних, зокрема в навчальному корпусі № 8. Система забезпечує моніторинг споживання електричної та теплової енергії, води, а також контроль температури теплоносія в подавальному та зворотному трубопроводах. Автоматичне накопичення даних створює основу для формування графіків, звітів, виявлення відхилень і підготовки обґрунтованих управлінських рішень.

Аналіз енергоспоживання навчальних корпусів і гуртожитків дає змогу визначати характерні періоди зростання навантажень, оцінювати вплив режимів використання приміщень і виявляти потенціал енергозбереження. Наприклад, у гуртожитку № 11 зафіксовано зростання споживання електроенергії у вечірні години, що пов’язано з поверненням мешканців і використанням побутових електроприладів.

Використання накопичених даних для моделювання та прогнозування дає змогу враховувати технічні, кліматичні й поведінкові чинники, планувати потребу в енергоресурсах і порівнювати фактичне споживання з очікуваними значеннями. Методологічною основою вдосконалення енергоменеджменту є цикл PDCA відповідно до ДСТУ ISO 50001:2020: планування заходів, їх реалізація, перевірка результатів і подальше вдосконалення.

Висновки. Автоматизований енергомоніторинг створює інформаційну основу для цифрового управління енергоспоживанням університету. Поєднання вимірювань, аналізу та прогнозування дає змогу своєчасно виявляти неефективні режими, обґрунтовувати енергоощадні заходи й оцінювати їх результативність. Подальший розвиток системи Smart Campus доцільно спрямувати на розширення охоплення будівель і вдосконалення моделей прогнозування.

Перелік джерел посилань

1. ДСТУ ISO 50001:2020. Системи енергетичного менеджменту. Вимоги та настанови щодо використання (ISO 50001:2018, IDT). Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2020.
2. Amasyali K., El-Gohary N. M. A review of data-driven building energy consumption prediction studies. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. Vol. 81. P. 1192–1205. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.095.
3. Fumo N. A review on the basics of building energy estimation. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014. Vol. 31. P. 53–60. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.11.040.

УДК 313.33:621.318.122

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АВТОНОМНОЇ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ

Чуєнко Р.М., к.т.н., доцент; Дужик В.В., студент

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна.

Актуальним наразі є питання впровадження поновлюваних джерел енергії. До таких видів належать: сонячна енергія, океанічна енергія припливів та відливів. Проте одним із найперспективніших на нашу думку є використання енергії вітру [1].

Окремі об’єкти, що знаходяться на великих відстанях від великих міст, невигідно включати в єдину енергосистему. Це обумовлює необхідність їх автономного енергопостачання шляхом використання дизельних електростанцій, вугільних, мазутних. У цих умовах, забезпечення електроенергією автономних споживачів, віддалених від центральної мережі та розташованих у віддалених сільських гірських районах, через використання поновлюваних джерел енергії є важливим та актуальним завданням [2].

Систему автоматичного регулювання вихідної електричної потужності безконтактного генератора постійного струму побудовано на основі методу підтримки максимальної потужності Структурно система автоматичного регулювання являє собою систему підпорядкованого регулювання, і складається з двох контурів: зовнішнього контуру регулювання швидкості і внутрішнього контуру регулювання потужності

Використовуючи розроблену імітаційну модель вітроустановки для різних значень швидкості вітру було розглянуто вплив кута атаки лопаті на швидкохідність турбіни та отримано залежність потужності вітрової турбіни від її швидкості та визначено значення максимуму коефіцієнта використання потужності турбін.

Моделювання вітроенергетичної установки на базі безконтактної електричної машини постійного струму, замкнутої двоконтурної системи підпорядкованого регулювання потужності, продемонструвало, що за рахунок алгоритмів управління можна підвищити ефективність роботи вітроенергетичної установки, значно зменшити коливання вихідної електричної потужності генератора та оптимізувати конструктивні параметри турбіни.

Перелік джерел посилань

1. Основи вітроенергетики: підручник / Г. Півняк, Ф. Шкрабець,О75 Н. Нойбергер, Д. Ципленков ; М-во освіти і науки України, Нац. гірн.ун-т. – Д.: НГУ, 2015. – 335 с

2. Тарасенко М. Г., Козак К.М., Omeiza L.A., Зінь М.М. Аналіз ефективності використання типових та не типових вітроенергетичних установок. Видання Хмельницького національного університету. Серія: «Технічні науки» 2023, №2. (319), С. 391-400.

УДК 313.33:621.318.122

ОБГРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ НИЗЬКООБЕРТОВИХ ГЕНЕРАТОРІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ У ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВКАХ

Чуєнко Р.М., к.т.н., доцент, Чернишенко А.С., студент

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна.

Аналіз вітрового потенціалу України показує, що малі вітроенергетичні установки потужністю 1÷5 кВт, розраховані на номінальну швидкість вітру 10÷12 м/с, будуть ефективно працювати тільки в Карпатах і ряді приморських регіонів України, що сумарно складає не більш 5% від усієї території країни.

На іншій території України середньорічна швидкість вітру не перевищує 5м/с, а це означає, що вітроенергетична установка потужністю 5 кВт, розрахована на номінальну швидкість вітру 10м/с, при швидкості вітру 5м/с забезпечить тільки 10% від своєї номінальної потужності. Подібна ситуація не є унікальною і властивою лише Україні, низький вітровий потенціал 5÷6 м/с має до 50% земної поверхні.

Нині на малих вітроенергетичних установках, для перетворення механічної енергії обертання валу вітроколеса в електричну енергію практично всюди використовуються безредукторні багатополюсні синхронні генератори з магнітоелектричним збудженням. Вони мають високу надійність та коефіцієнт корисної дії. Однак такі генератори мають високу ціну через постійно зростаючу вартість рідкісноземельних металів, застосовуваних для виготовлення постійних магнітів. За оцінкою експертів, вартість постійних магнітів у загальній вартості синхронного генератора з магнітоелектричним збудженням становить від 30 до 50%. Тільки за один 2025 рік вартість рідкісноземельних металів виросла на 20%. Очікується, що в подальшому їх вартість буде тільки зростати, збільшившись у два рази до 2030 року.

Крім того, більшість низькообертових вітроенергетичних установок належать до групи електричних машин торцевого (аксіального) типу. Такі машини при відносно малій масі й габаритах мають великий момент інерції. Початкова швидкість вітру для таких машин становить 2,5÷3м/с, відповідно при швидкості вітру 1,5÷2,5м/с такі електричні машини не працюють. Тому розробка й впровадження у виробництво нових типів дешевих та енергоефективних низькообертових вітроенергетичних установок, побудованих на базі генераторів постійного струму, є актуальною науково-практичною задачею.

Перелік джерел посилань

1. Гнедіна К. В. Тенденції розвитку альтернативної енергетики в Україні в контексті модернізації енергетичних ринків / К. В. Гнедіна, Я. В. Петраков, Н. Л. Ющенко. // Управління розвитком. – 2017. – №3. – С. 35–47.

2. Cost and Performance Characteristics of New Generating Technologies, Annual Energy Outlook 2019 [Електронний ресурс] // U.S. Energy Information Administration. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: https://www.eia.gov/outlooks/aeo/assumptions/pdf/table_8.2.pdf.

УДК 631.24.243

ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ЯК ЧИННИК НАДІЙНОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ

Радько І.П., к.т.н., доцент; Наливайко В. А., к.т.н., доцент; Окушко В. О., к.т.н., доцент; Червінський Л. С., д.т.н., професор

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

Електрична енергія є основою функціонування промислових підприємств, транспортних систем, комунального господарства та побутових споживачів. Ефективність використання електроенергії, надійність електрообладнання та стабільність технологічних процесів залежать не лише від безперервності електропостачання, але й від якості електричної енергії. Особливої актуальності ця проблема набуває в умовах поширення електронних перетворювачів, автоматизованих систем керування, електроприводів та іншого обладнання, чутливого до зміни параметрів електричної мережі.

Мета роботи – визначення основних чинників погіршення якості електричної енергії, оцінювання їхнього впливу на роботу електрообладнання та обґрунтування технічних заходів щодо підвищення надійності та ефективності електроспоживання.

Якість електричної енергії характеризується сукупністю параметрів, які визначають можливість нормальної та безпечної роботи електроустановок. До основних показників належать відхилення та коливання напруги, провали і перенапруги, відхилення частоти, несиметрія напруг трифазної системи, гармонічні спотворення, інтергармоніки та короткочасні перерви електропостачання.

Відхилення параметрів електричної енергії від установлених значень можуть спричиняти додаткові втрати електроенергії, перегрівання електричних машин і трансформаторів, скорочення строку служби ізоляції, порушення роботи пристроїв автоматики та виникнення аварійних режимів. Несиметрія напруг погіршує умови роботи трифазних електродвигунів, а гармонічні спотворення збільшують теплові навантаження та можуть негативно впливати на функціонування електронних пристроїв. Короткочасні перерви і провали напруги особливо небезпечні для технологічних процесів, у яких навіть нетривале припинення живлення призводить до зупинки обладнання.

Для підвищення якості електричної енергії необхідно реалізовувати комплекс технічних і організаційних заходів. Насамперед слід проводити систематичні вимірювання параметрів мережі та визначати причини їх відхилення. Для зменшення гармонічних спотворень доцільно застосовувати пасивні та активні фільтри, а для компенсації реактивної потужності – конденсаторні установки та інші компенсувальні пристрої. Зниження несиметрії напруг забезпечується раціональним розподілом однофазних навантажень між фазами. Для стабілізації напруги можуть використовуватися трансформатори з регулюванням, стабілізатори та системи автоматичного регулювання.

Важливе значення має правильний вибір потужності трансформаторів, перерізу кабелів і характеристик комутаційної апаратури з урахуванням фактичних навантажень та умов експлуатації. Для відповідальних споживачів, чутливих до перерв електропостачання, необхідно передбачати джерела безперебійного живлення, акумуляторні системи та резервні генератори.

Нормативною основою оцінювання характеристик напруги в електричних мережах України є ДСТУ EN 50160:2023, гармонізований з EN 50160:2022. Вимоги до якості електричної енергії також визначаються Кодексом систем розподілу. Дотримання нормативних вимог передбачає контроль параметрів електричної мережі, виявлення відхилень і своєчасне впровадження коригувальних заходів.

Отже, забезпечення належної якості електричної енергії є важливою умовою підвищення надійності електропостачання, енергоефективності та безпеки експлуатації електрообладнання. Поєднання систематичного моніторингу, компенсації реактивної потужності, фільтрації гармонік, балансування навантажень і резервування живлення дає змогу зменшити втрати електроенергії, продовжити строк служби обладнання та забезпечити стабільність технологічних процесів.

Перелік джерел посилань

1. ДСТУ EN 50160:2023. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності (EN 50160:2022, IDT). Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2023.
2. Кодекс систем розподілу: затверджений постановою НКРЕКП від 14.03.2018 № 310.
3. IEC 61000-4-30:2025. Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-30: Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2025.

УДК 631.24.243

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИЙ МОНІТОРИНГ І ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ В СИСТЕМАХ MICROGRID

Окушко В. О., к.т.н., доцент; Радько І.П., к.т.н., доцент;
Наливайко В. А., к.т.н., доцент; Червінський Л. С., д.т.н., професор
Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

Забезпечення надійної роботи електрообладнання є важливою умовою безперервності виробничих процесів, енергетичної безпеки та ефективного використання ресурсів. Традиційні методи технічного обслуговування, засновані на періодичних оглядах або ремонті після виникнення несправності, не завжди дають змогу своєчасно виявити початкові ознаки зношування. Особливо актуальною ця проблема є для електродвигунів, насосів, компресорів і вентиляторів, відмова яких може спричинити простої обладнання та додаткові фінансові витрати. Перспективним напрямом розв’язання проблеми є створення інтелектуальних систем моніторингу на базі Microgrid із використанням Інтернету речей (IoT), штучного інтелекту (AI) та машинного навчання.

Запропонована у вихідному дослідженні концепція передбачає інтеграцію сенсорної підсистеми, модуля збору даних, обчислювального комплексу та засобів візуалізації результатів. Для оцінювання технічного стану електродвигуна здійснюється безперервний контроль струму, напруги, температури обмоток або корпусу, вібраційного прискорення та частоти обертання ротора. Сукупність цих параметрів дає змогу визначати відхилення від нормального режиму роботи та формувати прогноз щодо можливого розвитку несправностей.

Отримані дані передаються до обчислювального модуля, де відбуваються попереднє оброблення інформації, аналіз часових залежностей і виявлення аномалій. Алгоритми машинного навчання можуть використовувати історичні дані про справне обладнання та попередні відмови для визначення характерних ознак деградації. Водночас ефективність прогнозування залежить від якості сенсорних вимірювань, репрезентативності навчальних даних і правильного вибору алгоритму.

Згідно з нашими дослідженнями [1] запропонована модель забезпечує похибку прогнозування відмов не більше 8 %, дає змогу виявляти аномалії за 1 – 2 години до виходу обладнання з ладу та скорочувати витрати на технічне обслуговування на 15 – 20 %. Ці показники стосуються результатів описаного дослідження, а їх відтворюваність необхідно перевіряти для різних типів електродвигунів і режимів експлуатації.

Додаткові наукові результати підтверджують перспективність застосування інтелектуальних методів діагностики. Так наприклад, у дослідженнях [2, 3, 4] систематизовано підходи до моніторингу технічного стану обладнання на основі машинного навчання. Автори наголошують на необхідності узгодження методів оброблення даних і моделей прогнозування з конкретними діагностичними завданнями. Для електродвигунів особливе значення мають аналіз вібраційних сигналів, температурних змін і електричних характеристик, які можуть свідчити про механічні або електричні несправності.

Отже, інтеграція IoT-сенсорів, аналітики даних і штучного інтелекту створює передумови для переходу від реактивного ремонту до прогнозного технічного обслуговування. Реалізація такого підходу в Microgrid сприятиме підвищенню надійності електрообладнання, скороченню аварійних простоїв і раціональному використанню енергетичних ресурсів.

Перелік джерел посилань

1. Окушко О., Наливайко В., Радько І., Сорокін Д., Кудрук Д. Інтелектуальна система моніторингу та прогнозування стану електрообладнання на базі Microgrid / . Енергетика і автоматика, 2025. DOI: https://doi.org/10.31548/energiya5(81).2025.

2. Surucu O., Gadsden S. A., Yawney J. Condition Monitoring using Machine Learning: A Review of Theory, Applications, and Recent Advances. Expert Systems with Applications. 2023. Vol. 221, 119738. DOI: 10.1016/j.eswa.2023.119738.

3. Wu P., Mei X. Microgrids energy management considering net-zero energy concept: The role of renewable energy landscaping design and IoT modeling in digital twin realistic simulator. Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2024. Vol. 63, 103621. DOI: 10.1016/j.seta.2024.103621.

4. Digital twin based microgrid control and energy management: Trends, challenges, and future directions. Computers and Electrical Engineering. 2026. Vol. 134, 111100. DOI: 10.1016/j.compeleceng.2026.111100

УДК 621.311.1:004.8

ПРОГНОЗУВАННЯ ВИРОБІТКУ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ У MICROGRID

Н.М. Білоус [1], ***Д.С. Сорокін*** [2]

[1]*Національний університет біоресурсів і природокористування України,*

У роботі досліджено методи прогнозування виробітку електроенергії з відновлюваних джерел у мікромережах (Microgrid). Проаналізовано фізичні, статистичні та сучасні підходи машинного навчання. Особливу увагу приділено моделям глибокого навчання, зокрема 1-D CNN та LSTM, які дозволяють враховувати нелінійні залежності у часових рядах метеорологічних і енергетичних даних. На основі експериментального дослідження з використанням реальних даних встановлено, що модель 1-D CNN забезпечує вищу точність прогнозування порівняно з класичними методами. Отримані результати підтверджують доцільність застосування глибокого навчання в системах енергоменеджменту мікромереж.

Ключові слова: *Microgrid, відновлювані джерела енергії, прогнозування генерації, машинне навчання, глибоке навчання, згорткові нейронні мережі, LSTM, часові ряди, енергоменеджмент.*

Сучасний розвиток енергетичних систем характеризується переходом до децентралізованих моделей енергопостачання, важливою складовою яких є мікромережі (Microgrid). Такі системи забезпечують інтеграцію розподілених джерел генерації, зокрема відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), включаючи сонячні та вітрові електростанції, а також системи накопичення енергії та керовані навантаження. Мікромережі можуть функціонувати як у складі централізованої енергосистеми, так і автономно, забезпечуючи енергетичну незалежність та підвищену надійність електропостачання.

Однією з ключових проблем функціонування мікромереж є стохастичний характер генерації відновлюваних джерел. Виробіток електроенергії безпосередньо залежить від змінних метеорологічних умов, таких як інсоляція, швидкість вітру, температура та хмарність. Це призводить до виникнення небалансів між генерацією та споживанням електроенергії, що ускладнює процеси управління та може спричиняти додаткові витрати на балансування. У зв’язку з цим важливим завданням є розробка ефективних методів прогнозування, здатних забезпечити високу точність передбачення виробітку електроенергії.

У роботі проведено аналіз існуючих підходів до прогнозування генерації ВДЕ. Фізичні моделі базуються на використанні чисельних прогнозів погоди та враховують процеси атмосферної динаміки, однак характеризуються значною обчислювальною складністю та обмеженою точністю на локальному рівні.

Статистичні методи, зокрема множинна лінійна регресія та моделі часових рядів, дозволяють встановити залежності між метеорологічними параметрами та виробітком, але не здатні ефективно описувати нелінійні процеси. Методи машинного навчання та глибокого навчання демонструють значно кращі результати завдяки здатності виявляти складні закономірності у великих масивах даних. Особливий інтерес становлять гібридні підходи, що поєднують різні типи моделей для досягнення максимальної точності прогнозування.

Для дослідження ефективності різних підходів було використано дані генерації електроенергії та метеорологічні показники. Попередня обробка даних включала нормалізацію значень, інтерполяцію пропущених даних та формування додаткових ознак, що враховують сезонність і добові цикли. Дані були розділені на навчальну, валідаційну та тестову вибірки, що забезпечило об'єктивну оцінку якості моделей.

У рамках дослідження реалізовано моделі прогнозування на основі одновимірних згорткових нейронних мереж (1-D CNN) та рекурентних мереж довгої короткострокової пам'яті (LSTM). Отримані результати показали, що обидві моделі забезпечують високу точність прогнозування, проте модель 1-D CNN демонструє кращі показники за критеріями середньоквадратичної та середньої абсолютної похибок. Зокрема, для прогнозування сонячної генерації досягнуто значення MSE на рівні 0.005 та коефіцієнта детермінації R^2 близько 0.899. Для вітрової генерації також підтверджено перевагу моделей глибокого навчання порівняно з базовими методами.

Порівняльний аналіз показав, що класичні підходи, такі як метод персистенції та множинна лінійна регресія, мають значно нижчу точність, особливо при довгостроковому прогнозуванні. Метод регресії опорних векторів демонструє задовільні результати, однак поступається нейронним мережам за масштабованістю та швидкістю обробки великих обсягів даних. Водночас використання згорткових нейронних мереж дозволяє ефективно враховувати просторово-часові залежності та забезпечує швидке виконання прогнозів, що є важливим для систем реального часу.

Отримані результати підтверджують доцільність використання методів глибокого навчання для задач прогнозування виробітку ВДЕ у мікромережах. Висока точність прогнозів дозволяє оптимізувати роботу систем накопичення енергії, зменшити небаланси потужності та підвищити ефективність функціонування енергетичних систем. Подальші дослідження доцільно спрямувати на розробку гібридних моделей, а також на інтеграцію імовірнісного прогнозування для врахування невизначеності та ризиків у процесах управління мікромережами.

Перелік джерел посилань

1. Stoliarov, O. Efficient electricity generation forecasting from solar power plants using technology: Integration, benefits and prospects. Bulletin of Cherkasy State Technological University. 2024. Vol. 29, no. 1. P. 73–85. DOI: https://doi.org/10.62660/bcstu/1.2024.73

2. Відновлювані джерела енергії: вид. 3-тє, оновлене / за заг. ред. С. О. Кудрі. Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАНУ, 2025. 512 с. ISBN 978-966-641-9

3. Kholiavka Y., Parfenenko Y. Intelligent energy consumption forecasting and microgrid state assessment using machine learning and fuzzy logic. Technology Audit and Production Reserves. 2025. Vol. 3, no. 2(83). P. 20–26. DOI: https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.329154
4. Singh A. R., Kumar R. S., Bajaj M. et al. Machine learning-based energy management and power forecasting in grid-connected microgrids with multiple distributed energy sources. Scientific Reports. 2024. Vol. 14. Art. 19207. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-024-70336-3
5. Іванченко А. М., Павленко В. М. Оптимізація розподілу енергії в мікромережах з інтеграцією ВДЕ. У: Енергоефективний університет: матеріали XIV Міжнар. наук.-практ. конф. (23 жовт. 2025 р.). Київ: КНУТД, 2025. С. 37–40.
6. Усенко С. М., Пономаренко Є. О., Каплун Р. В., Іващук В. В. Система моніторингу та управління електроспоживанням в мікроенергосистемі територіальної громади з власними джерелами. Енергетика і автоматика. 2025. № 6. С. 61–78. DOI: https://doi.org/10.31548/energiya6(82).2025.061

УДК 662.63:662.9:681.5:004.8

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ СПАЛЮВАННЯ НЕСТАНДАРТИЗОВАНОГО БІОПАЛИВА У ТЕПЛОГЕНЕРАТОРАХ

Загородній Р. І., к.т.н., доцент
Тернопільський національний педагогічний університет імені Володимира Гнатюка, м. Тернопіль, Україна.

Одним із пріоритетних напрямків розвитку енергетичного сектору України є підвищення енергетичної незалежності шляхом диверсифікації джерел енергії та залучення відновлюваних енергетичних ресурсів. Особливої актуальності набуває поступове заміщення природного газу біопаливом місцевого походження, що зумовлено підвищенням стійкості систем теплогенерації та ефективного використання наявного ресурсного потенціалу територіальних громад.

Україна володіє значним потенціалом для виробництва твердого біопалива на основі відходів сільського господарства, деревообробного виробництва. До таких ресурсів належать: деревна тріска, тирса, солома, лушпиння соняшнику, відходи переробки і очистки зернових культур та інша біомаса. Їх використання у вигляді палива створює передумови для формування локальних систем теплогенерації, які працюють із використанням доступних місцевих енергетичних ресурсів.

Водночас ефективне використання твердого біопалива місцевого походження з однорічним циклом відновлення потребує відповідного технологічного обладнання. Одним із найбільш перспективних рішеньє застосування вихрових біотеплогенераторів, які забезпечують перетворення хімічної енергії біомаси на теплову енергію для опалення будівель, гарячого водопостачання та технологічних потреб підприємств. Проте ефективність їх експлуатації значною мірою залежить від стабільності та ефективності процесу горіння, якістю підготовки паливної суміші та можливістю оперативного регулювання основних технологічних параметрів.

Особливість спалювання такого палива полягає у значній варіативності його фізико-хімічних характеристик. Зміна вологості, фракції, насипної густини

та теплотворної здатності безпосередньо впливає на інтенсивність горіння, температуру в камері згорання а в кінцевому на продуктивність та енргоефективність теплогенератора. За відсутності належного автоматичного регулювання такі зміни призводять до нестабільного процесу горіння, збільшення витрат палива, зростання концентрації продуктів неповного згорання палива та зниження коефіцієнта корисної дії обладнання.

Тому актуальним науково-технічним завданням є розроблення інтелектуальної системи управління процесом спалювання біопалива, здатної адаптувати режим роботи теплогенератора до змін характеристик палива та поточного теплового навантаження. На відміну від традиційних систем автоматизації, які працюють переважно за фіксованими алгоритмами регулювання, інтелектуальна система повинна забезпечувати аналіз поточного стану технологічного процесу, визначення відхилень від оптимальних параметрів та формування відповідних керуючих впливів.

Концепція такої системи передбачає використання комплексу вимірювальних пристроїв, програмованого логічного контролера, виконавчих механізмів та спеціалізованого алгоритмічного забезпечення. Основними контрольованими параметрами доцільно визначити температуру в камері згоряння, температуру теплоносія, температуру відхідних газів, вміст кисню в продуктах згоряння, розрідження в топці та параметри подачі палива.

На основі отриманих даних система управління повинна автоматично коригувати продуктивність механізму подачі біомаси, інтенсивність подачі первинного і вторинного повітря, а також роботу вентиляційного та димовидалювального обладнання. Особливе значення має забезпечення узгодженого регулювання подачі палива та повітря, оскільки саме співвідношення цих компонентів визначає повноту згоряння біомаси, теплову ефективність і рівень шкідливих викидів.

Принциповою особливістю запропонованого підходу є використання інтелектуальних алгоритмів прийняття рішень. Зокрема, перспективним є застосування нечіткої логіки (Fuzzy Logic), адаптивних регуляторів та елементів машинного навчання. Використання нечітких алгоритмів дозволяє враховувати складні нелінійні залежності між параметрами горіння, які важко описати традиційними математичними моделями. Наприклад, за зниження температури в камері згоряння та збільшення концентрації кисню система може коригувати подачу палива й повітря з урахуванням поточного режиму роботи обладнання.

Додатковою можливістю є створення цифрової моделі теплогенератора, яка дасть змогу досліджувати вплив зміни характеристик біопалива на параметри процесу горіння, моделювати різні режими роботи та визначати оптимальні налаштування системи управління ще до їх практичного впровадження. Поєднання математичного моделювання з даними, отриманими від реального обладнання, створює передумови для подальшого розвитку адаптивних систем управління.

Запровадження такої системи дозволить перейти від традиційного підтримання окремих технологічних параметрів до комплексного інтелектуального управління процесом спалювання біомаси. Очікуваними

результатами є підвищення стабільності горіння, раціональне використання палива, зменшення втрат теплової енергії, покращення екологічних характеристик роботи обладнання та скорочення потреби в постійному ручному втручанні оператора.

Перелік джерел посилань

1. Технології біоресурсної диверсифікації джерел енергії на базі генераторів-утилізаторів: монографія / Федорейко В. С., Горбатюк Р. М., Бурега Н. В. та ін.; за заг. ред. В. С. Федорейка. Тернопіль: Редакційно-видавничий відділ ТНПУ імені Володимира Гнатюка, 2022. 288 с.

СЕКЦІЯ 2.
ПРОЦЕСИ В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ ТА СИСТЕМАХ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ ВІДНОВЛЮВАНИХ І НЕТРАДИЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ

УДК 621.311.1-192:621.355

ОЦІНЮВАННЯ НАДІЙНОСТІ ІЗОЛЬОВАНИХ МІКРОМЕРЕЖ ІЗ НАКОПИЧУВАЧАМИ ЕНЕРГІЇ ЗА ПОКАЗНИКАМИ ДЕФІЦИТУ ПОТУЖНОСТІ

Давидков А. В., аспірант

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна.

В ізольованій мікромережі живлення критичних споживачів залежить від місцевої генерації та доступного резерву енергії. Для систематизації методів керування надійністю зіставлено дослідження за способами моделювання відмов і невизначеності, використання накопичувачів та перевірки алгоритмів. Порівняння має якісний характер, оскільки результати окремих праць отримано для різних конфігурацій мережі, профілів споживання та сценаріїв відмов.

Потужність та енергоємність акумуляторного накопичувача можна добирати за компромісом між витратами й очікуваною недовідпущеною електроенергією (EENS) [1]. Доступний резерв залежить від стану заряду, деградації батареї та обмежень перетворювача. У добовому плануванні сценарії генерації й попиту поєднують із робастним урахуванням відмов та перенесенням гнучкого навантаження [2].

Під час вибору накопичувача імовірнісні обмеження дають змогу задати допустимий ризик виходу стану заряду за встановлені межі. За жорсткіших обмежень може знадобитися батарея більшої енергоємності [1]. Для оперативного планування важливо оцінювати запас енергії на момент можливої відмови джерела. Перенесення гнучкого навантаження на години з більшою доступною генерацією допомагає зберегти запас батареї для критичних споживачів [2].

Після пошкодження керовані комутаційні апарати дають змогу ізолювати аварійну ділянку та відновити живлення пріоритетних споживачів через резервні зв’язки [3]. Під час відновлення після повного знеструмлення мережотвірний накопичувач формує напругу й частоту, а черговість підключення трансформаторів і навантажень узгоджують з пусковими струмами та обмеженнями перетворювача [4]. Апаратно-програмне моделювання в реальному часі дає змогу перевірити реакцію контролера на збурення та координацію накопичувача з керованими навантаженнями [5].

Для порівняння конфігурацій мікромережі EENS доцільно доповнювати очікуваною тривалістю дефіциту потужності (LOLE). EENS характеризує обсяг недовідпуску енергії, а LOLE показує, як довго доступної потужності бракуватиме для покриття попиту. Розрахунок цих показників за часовими рядами генерації, навантаження і стану заряду дає змогу зіставляти варіанти

резервування [6]. Допустимість відхилень напруги й частоти після відмови перевіряють окремим розрахунком перехідних режимів.

За результатами огляду окреслено три рівні керування надійністю. На етапі проєктування визначають склад джерел, параметри накопичувача й резервні зв'язки. Під час планування режимів задають запас енергії та графік керованих навантажень. Після аварії застосовують пріоритетне відключення частини навантаження та поетапне відновлення живлення. У подальшому моделюванні доцільно оцінити EENS окремо для критичних споживачів і перевірити відхилення частоти й напруги під час аварійних перемикань.

Перелік джерел посилань

1. Huo D. et al. A reliability-aware chance-constrained battery sizing method for island microgrid. Energy. 2022. 251. 123978. DOI 10.1016/j.energy.2022.123978.
2. Tostado-Véliz M. et al. A Stochastic-IGDT model for energy management in isolated microgrids considering failures and demand response. Applied Energy. 2022. 317. 119162. DOI 10.1016/j.apenergy.2022.119162.
3. Lee J., Razeghi G., Samuelsen S. Generic microgrid controller with self-healing capabilities. Applied Energy. 2022. 308. 118301. DOI 10.1016/j.apenergy.2021.118301.
4. Shahparasti M. et al. Inrush current management during medium voltage microgrid black start with battery energy storage system. IEEE Access. 2022. 10. 42287–42296. DOI 10.1109/ACCESS.2022.3167701.
5. Archetti J. A. G. et al. Real time validation of a control system for microgrids with distributed generation and storage resources. Electric Power Systems Research. 2023. 223. 109683. DOI 10.1016/j.epsr.2023.109683.
6. Gholami M., Muyeen S. M., Mousavi S. A. Development of new reliability metrics for microgrids: Integrating renewable energy sources and battery energy storage system. Energy Reports. 2023. 10. 2251–2259. DOI 10.1016/j.egyr.2023.09.047.

УДК 621.311.21:620.9

МАЛА ГІДРОЕНЕРГЕТИКА В УМОВАХ ТРАНСФОРМАЦІЇ ЕНЕРГЕТИЧНОГО СЕКТОРУ УКРАЇНИ

Бабич М. І., к.т.н., доцент

Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Ґжицького, м. Львів, Україна.

Трансформація енергетичного сектору України відбувається в умовах значних структурних змін, зумовлених воєнними діями, систематичними атаками на енергетичну інфраструктуру та необхідністю відновлення пошкоджених потужностей. Упродовж повномасштабної війни пошкоджень зазнають різні складові енергетичної системи, зокрема об'єкти виробництва, передачі та розподілу електроенергії. Це суттєво впливає на можливості забезпечення стабільного енергопостачання та засвідчило необхідність перегляду підходів до організації енергетичної інфраструктури. За таких умов особливої актуальності набувають диверсифікація джерел генерації, розвиток децентралізованої енергетики та підвищення стійкості енергетичної системи України [1].

Одним із перспективних напрямів трансформації енергетичного сектору є розвиток малої гідроенергетики. Її значення полягає не лише у виробництві

електроенергії з відновлюваних джерел, а й у формуванні територіально розосередженої системи генерації. На відміну від великих гідроелектростанцій, малі ГЕС характеризуються меншою одиничною потужністю, що створює можливості для їх розміщення поблизу споживачів та інтеграції в регіональні енергетичні системи.

За орієнтовними оцінками, сумарна встановлена потужність малих ГЕС України становить 120–180 МВт, тоді як технічний потенціал малих річок оцінюється на рівні 350–375 МВт. Найбільші можливості для розвитку галузі зосереджені в Карпатському регіоні, на який припадає понад 70 % загального потенціалу. Водночас рівень використання наявних гідроенергетичних ресурсів залишається недостатнім, що свідчить про перспективність подальшого розвитку цього напряму [2, 3].

Важливою перевагою малої гідроенергетики є її здатність сприяти підвищенню енергетичної автономності територіальних громад. Розміщення генеруючих потужностей поблизу споживачів дає змогу зменшувати навантаження на магістральні електромережі, скорочувати втрати під час транспортування електроенергії та підвищувати надійність регіонального енергопостачання. Особливого значення це набуває для віддалених і гірських територій, де розвиток локальних джерел генерації може стати важливим чинником енергетичної незалежності.

Подальший розвиток малої гідроенергетики потребує не лише будівництва нових об’єктів, а й модернізації діючих електростанцій. Використання сучасного енергетичного обладнання, автоматизованих систем управління та технологій підвищення ефективності дозволить покращити експлуатаційні характеристики малих ГЕС. Водночас реалізація таких проєктів повинна супроводжуватися оцінюванням екологічного впливу, збереженням природного гідрологічного режиму річок та дотриманням вимог щодо охорони водних екосистем.

Важливим напрямом розвитку малої гідроенергетики є формування системи регіональних інвестиційних проєктів, реалізація яких забезпечуватиме поступове нарощування генеруючих потужностей. Такий підхід дає змогу розподіляти фінансові та технічні ризики, враховувати потреби окремих територій і забезпечувати гнучкість управління процесами модернізації та будівництва малих ГЕС. Додаткові можливості для реалізації таких ініціатив створюють механізми державно-приватного партнерства та залучення міжнародного фінансування [1].

Отже, мала гідроенергетика є одним із перспективних напрямів трансформації енергетичного сектору України. Її розвиток сприятиме диверсифікації джерел генерації, децентралізації виробництва електроенергії, підвищенню енергетичної автономності регіонів та стійкості енергетичної системи. Водночас мала гідроенергетика не повинна розглядатися як альтернатива великим ГЕС, а має доповнювати їх у межах збалансованої моделі розвитку галузі. Пріоритетними завданнями мають стати модернізація діючих малих ГЕС, екологічно обґрунтоване освоєння потенціалу малих річок, насамперед Карпатського регіону, та інтеграція локальних генеруючих потужностей в енергетичну інфраструктуру територіальних громад.

Перелік джерел посилання

1. Бабич М.І., Боярчук В.М., Коробка С.В., Пташник В.В. Підвищення рівня енергетичної безпеки за рахунок впровадження комплексних проєктів з відновлюваних джерел енергії та гідроенергетики. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2024. Вип. 24, т. 1. С. 296-304.
2. Бриль А. О., Васько П. Ф., Мороз А. В. Технічний потенціал гідроенергетичних ресурсів малих річок України з урахуванням природоохоронних обмежень. *Гідроенергетика України*. 2019. № 3–4. С. 47–51.
3. Halych O., Bilkova E., Nowak P., Riabenko O. A review on hydropower in Ukraine – its state, role in the energy system and potential for post-war recovery. *Energy Strategy Reviews*. 2025. Vol. 62. Article 101997. DOI: https://doi.org/10.1016/j.esr.2025.101997

UDC 621.311+656

PERFORMANCE EVALUATION OF METAHEURISTIC MPPT ALGORITHMS FOR PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

Dubovyk Volodymyr[1], senior lecturer; Honcharuk Illia[2], student; Chernetskyi Mykhailo[3], student

[123]Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine

This evaluates five bio-inspired metaheuristic algorithms, comprising GWO, Horse Herd Optimization (HHO), Chameleon Swarm Algorithm (CSA), SCSO, and FSSO, for MPPT in low-power PV systems. The assessment focuses on tracking efficiency, convergence speed, and completion time under static and dynamic irradiance conditions. The results are expected to provide a quantitative reference for selecting appropriate MPPT algorithms in low-power PV applications. The system consists of a PV module, a bio-inspired metaheuristic maximum power point tracking (MPPT) controller, and a DC–DC boost converter supplying a resistive load, as shown in Fig. 1. Irradiance (G) and temperature (T) generate the PV voltage (Vpv) and current (Ipv), which are processed to determine the optimal duty cycle (D) for pulse width modulation (PWM) control to ensure operation at MPP.

The resulting power extraction at 800 W/m^2, HHO achieved 198 W, followed closely by FSSO with 198 W. CSA showed the largest oscillation (1.38%), whereas GWO maintained relatively stable power. When irradiance decreased to 600 W/m^2, HHO again achieved the highest power of 150 W with the fastest convergence time of 0.02 s. GWO and SCSO produced approximately 147 W, with settling times of 0.022 s and 0.026 s. CSA and FSSO showed initial oscillations of 2.22% and 1.89%, respectively.

When irradiance to 1000 W/m^2, all algorithms rapidly recovered toward the 250 W MPP. HHO and FSSO exhibited brief transient surges before stabilizing. Overall, HHO demonstrated the most favourable performance among CSA, FSSO, SCSO, and GWO. It achieved the fastest tracking time, steady-state power closest to the MPP, and the smallest voltage, current, and power ripple. Its adaptive exploration–exploitation mechanism enables rapid convergence with minimal oscillation. The 99.96% efficiency achieved by HHO here is consistent with HHO based MPPT results reported for PV systems of differing scale, ranging from 99.64% to 99.98% across nominal

powers of 250÷1720 W, indicating stable convergence behaviour independent of system size. These results reinforce the suitability of HHO for MPPT optimization in PV systems.

The proposed system was simulated in MATLAB/Simulink for 1 s with a sampling period of Ts = 1 x 10^{-6} s, consisting of a PV module, bio-inspired metaheuristic MPPT controller, PWM, and a resistive load. Performance was evaluated in terms of tracking efficiency (MPPT), power ripple, and convergence time under STC and dynamic irradiance conditions. All algorithms rapidly increased the PV voltage and stabilized around the nominal MPP value of 30.5 V. HHO and GWO exhibited smoother convergence with minimal oscillation, whereas FSSO and CSA showed larger transient fluctuations. The current responses stabilized near 8.2 A, with HHO and GWO achieving faster settling and lower ripple. where HHO and GWO reached values closest to the ideal 250 W, with ripples of 0.08% and convergence times of 0.046 s and 0.04 s, respectively. SCSO and FSSO achieved 248.7 W in 0.074 s and 0.081 s, while CSA required 0.051 s to reach 248 W. Although FSSO showed the largest ripple (0.88%), it remained within acceptable tracking stability (<1%), with corresponding efficiency and power values under varying irradiance.

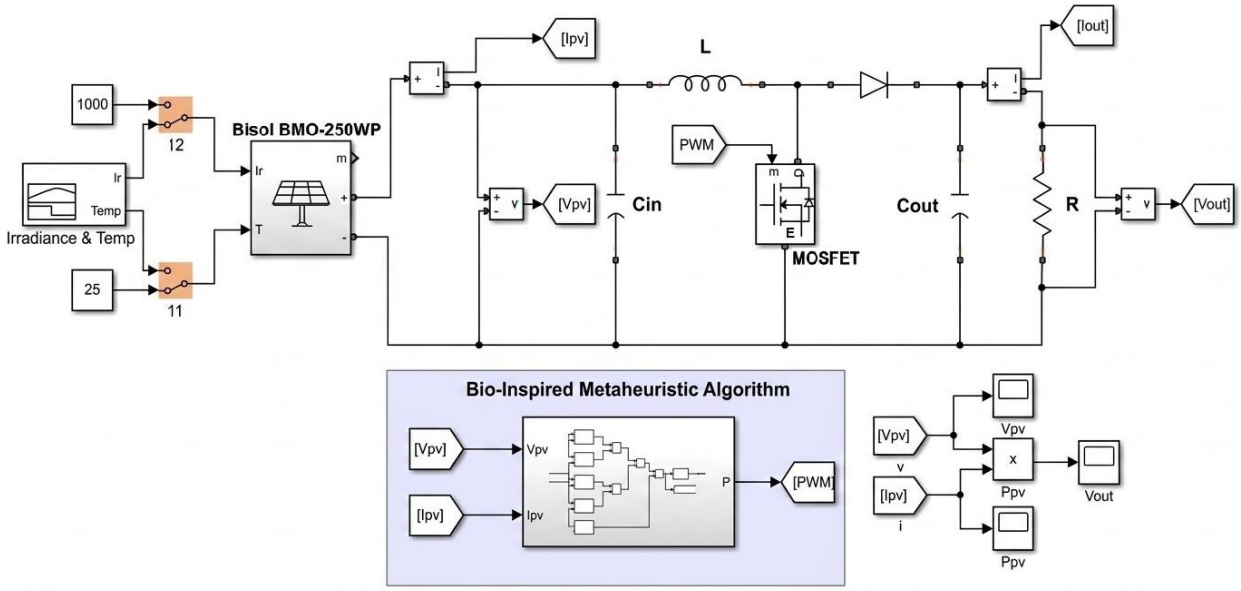


Figure 1. Photovoltaic system model

While all methods achieved satisfactory MPP tracking, CSA and FSSO showed initial oscillations under irradiance changes, and GWO and SCSO experienced reduced efficiency at low irradiance. HHO consistently demonstrated the best overall performance and highest efficiency. The reported results are based on single-run simulations without a direct comparison against conventional P&O or InC baselines, so the observed efficiency margins should be interpreted as indicative rather than statistically confirmed. Future work will address hardware implementation, testing under complex temperature variations and partial shading, multiple independent trials with statistical validation, and direct comparison against conventional MPPT methods, considering practical nonidealities.

References

1. Worku M. Y., M. A. Hassan, L. S. Maraaba et al. (2023) A comprehensive review of recent maximum power point tracking techniques for photovoltaic systems under partial shading, Sustainability, 15(14), 11132.
2. Agdam M., K. Assalaou, E. Aitiaz et al. (2024) A novel algorithm MPPT controller based on the herd horse optimization for photovoltaic systems under partial shadow conditions, Eng. Res. Express, 6(3), 035308.
3. Chowdhury S. B. R., P. K. Gayen, S. Roy et al. (2022) A novel MPPT algorithm for PV systems under variable shading conditions using horse herd optimization, J. Electr. Syst., 18(1), 82–96.

UDC 621.311+656

PHOTOVOLTAIC SYSTEMS USING A SEARCH ALGORITHM UNDER PARTIAL SHADING CONDITIONS

Dubovyk Volodymyr[1], senior lecturer; Dushenok Polina[2], student; Forkosh Kostiantyn[3], student

[123]Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine

The solar system relies on PV phenomena to generate voltage and current when light strikes a semiconductor device. The nonlinear voltage-current relationship leads to a single maximum power point on the power-voltage (P-V) curve. To optimize power output, a maximum power point tracking (MPPT) controller is essential. Several MPPT controllers have been developed over time, with conventional MPPT techniques being the earliest versions. The fractional open circuit voltage and fractional short circuit current algorithms are offline techniques that use a single sensor and require the system to be short-circuited or disconnected during operation. The hill-climbing technique is another common MPPT algorithm that climbs the summit of the P-V curve. However, the perturb and observe (P&O) and incremental conductance (INC) algorithms used in hill climbing techniques are ineffective under partial shading conditions (PSC).

AI-based MPPT algorithms, such as artificial neural networks, fuzzy logic control, and adaptive network-based fuzzy interface systems, can overcome the downsides of conventional MPPT techniques under PSC. However, these approaches have limitations, such as requiring prior system knowledge, large memory needs, and sophisticated hardware. Metaheuristics techniques, which mimic the natural behavior of plants and animals, are the most recent developments in MPPT. Examples include particle swarm optimization (PSO), grey wolf optimization, ant colony optimization, and flower pollination algorithms. Although metaheuristics have advantages, such as locating the global maximum power peak (GMPP), they also have downsides, such as complex tuning parameters and increased tracking time with iterative processes.

The scanning method is a commonly used algorithm for MPPT, which involves scanning the P-V curve to find the GMPP. However, due to the lengthy tracking time, scanning the entire P-V curve to locate the GMPP is not always effective. To address this issue, the authors investigated various methods for reducing the regions that must be scanned on the P-V curve. Some famous scanning methods include the search-skip-judge method, modified maximum power trapezium method, and voltage window search (VWS) method. These methods skip certain parts of the P-V curve during the scanning process, significantly reducing the tracking time.

The model of the system under consideration is shown in Fig. 1. The scheme is divided into five separate sections: 1, 2, 3, 4, and 5. Section 1 consists of a string of photovoltaic (PV) modules. Section 2 describes the FPPT algorithm. The input variables for this algorithm are VPV, IPV, and PFPP, while the output is VREF. Section 3 contains a control unit featuring a voltage regulation loop to ensure system stability. The difference between VREF and VPV is fed to the input of a proportional-integral (PI) controller.

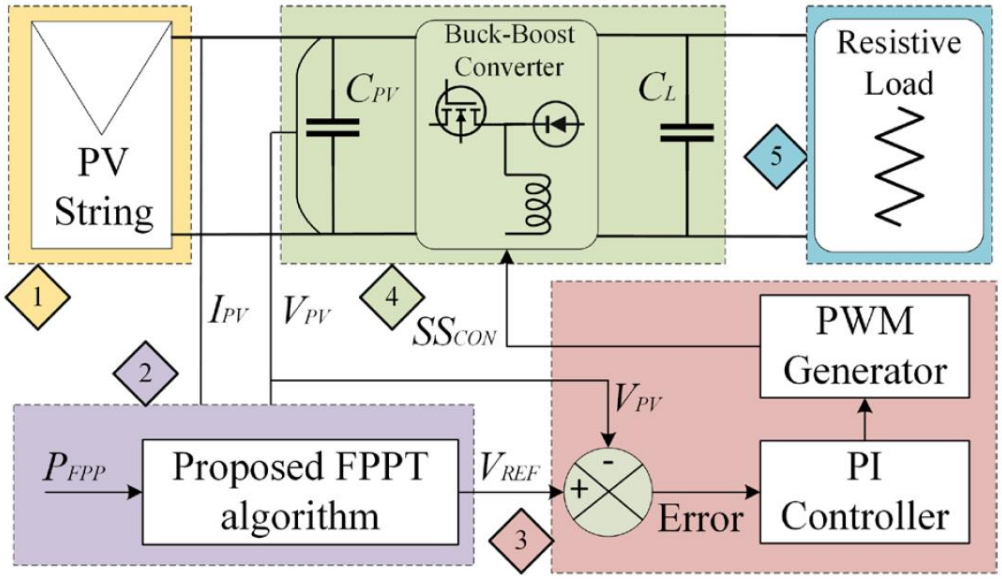


Figure 1. Schematic diagram of the model under consideration

As the popularity of solar energy rapidly grows, so do the possibilities for contributing to the grid. In many large-scale solar projects, solar energy is integrated into the grid to distribute solar PV power to the wider community. However, if the grid receives more solar PV power than it needs to meet demand, the system can become overloaded, and the inverter and protective equipment may be damaged. The flexible power point tracking (FPPT) algorithm is adopted to circumvent these constraints instead of the MPPT algorithm. Unlike the MPPT algorithm, the FPPT algorithm does not operate solely on the peak point of the P-V curve; rather, it operates on any desired point. In this case, the system obtains the power requirement from the grid, and the FPPT algorithm tracks the point on the P-V curve depending on the required power. If the required power is more than the maximum available power of the solar PV system, the FPPT algorithm will function like the MPPT algorithm to supply the maximum power to the grid. An innovative FPPT method is presented, designed to eliminate common drawbacks and enhance operational efficiency (particularly under partial shading conditions—PSC) while ensuring high tracking speed.

References

1. H. Khan, H. A. Sher, S. Member, A. Hussain, A. M. Noman, and A. L. I. F. Murtaza, “Improved RCC-Based MPPT Strategy for Enhanced Solar Energy Harvesting in Shaded Environments,” IEEE Access, vol. 12, no. July, pp. 111035–111044, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024. 3440841.
2. H. W. Yan et al., “Flexible Power Point Tracking Aided Power Ramp Rate Control for Photovoltaic Systems With Small,” IEEE Trans. Power Electron., vol. 39, no. 2, pp. 2798–2810, 2024, doi: 10.1109/ TPEL.2023.3333534.

3. V. D. Paduani, H. Yu, B. Xu, and N. Lu, “A Unified Power-Setpoint Tracking Algorithm for Utility-Scale PV Systems With Power Reserves and Fast Frequency Response Capabilities,” IEEE Trans. Sustain. Energy, vol. 13, no. 1, pp. 479–490, 2022.

UDC 621.311+656

ADVANCED LEARNING FOR FORECASTING IN WIND ENERGY

Dubovyk Volodymyr[1], senior lecturer; Bobyr Ruslan[2], student; Khilyuk Anya[3], student

[123]Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine

Accurate high-resolution wind power forecasting (WPF)is very challenging as it is affected rapidly by many direct or latent factors. For example, the speed of wind turbine blades depends on howfast the wind is blowing, and so wind speeds directly influence electricity generation. Besides, temperature, humidity, or atmospheric pressure indirectly influence wind power generation. These factors closely relate to local air density, while different air density asserts different pressure on the rotors. The “heavier” the air is, the more energy received by the turbine. Other features like the date or the time of a day are also important features for forecasting, as they can reveal distinctive weather conditions like monsoons that can imply wind speed or wind direction. Generally, all these factors need to be
well-modelled for an accurate forecasting. However, most of them do not thoroughly construct dependencies of generated power on intricate sequential input observations However, most existing works towards WPF ignore the complicated dependencies of generated power on intricate sequential input variable observations.

Figure 1 illustrates the general architecture of the WPF model. The model takes historical observational data for multiple variables and corresponding timestamps as input. These inputs are transformed into convolutional features and temporal embeddings; their concatenated vectors serve as input to the core DEWP model. The core model, shown in the center of the figure, features a multi-level (stacked) architecture in which each level consists of a variable-wise expansion block and a time-wise expansion block. The detailed architecture of each level and block is shown on the right side of Fig. 1. The variable-wise and time-wise expansion blocks are designed to capture complex inter-variable dependencies and temporal patterns, respectively. Following the expansion operations, each level outputs hidden expanded states, which comprise two main components: a backcast component and a forecast component. The backcast component—treated as the level's residual—is subtracted from the input data before it is passed to the next level; this enables level-wise learning based on expansion residuals. The forecast component from each level is fed into a corresponding Inference Block, where the hidden expansion results are converted into future wind power generation values, thereby facilitating the generation of detailed forecasts at each level. The results obtained from each Inference Block are aggregated to produce the final wind power generation forecast.

We observed that DEWP beats all the baseline algorithms and achieve the smallest prediction error in most cases, which demonstrates the superiority in short-term WPF. For example, DEWP improves MAPE of the second best result about (3.292 −

2.848)/3.315 ≈ 13.4% in R80736 dataset. The improvement of MASE in R80721 dataset also comes to (41.78−37.25)/41.78 ≈ 10.8%. We found that DEWP with lookback as 24 can achieve the competitive performance of lookback as 72. This verifies the strong prediction ability even with short lookbacks of our method. Linear model always has the worst performances compared with other methods. This reveals the relationship between future generated power and historical observations is a latent non-linear mapping. The superiority of DEWP with regard to other forecasting methods also indicates that the baseline methods do not have enough expressiveness and do not model complicated dependencies. Thus, we need the delicate modelling of deep learning designs such as DEWP. Firstly, we observed the overall performances are worse than short-term forecasting. This is intuitive considering the historical information is not enough to predict the distant future points, as wind power includes too much uncertainty. In this case,we can still observe DEWP outperforms all other baselines and achieves the best performances in all metrics, which signifies better ability for
long-term WPF.

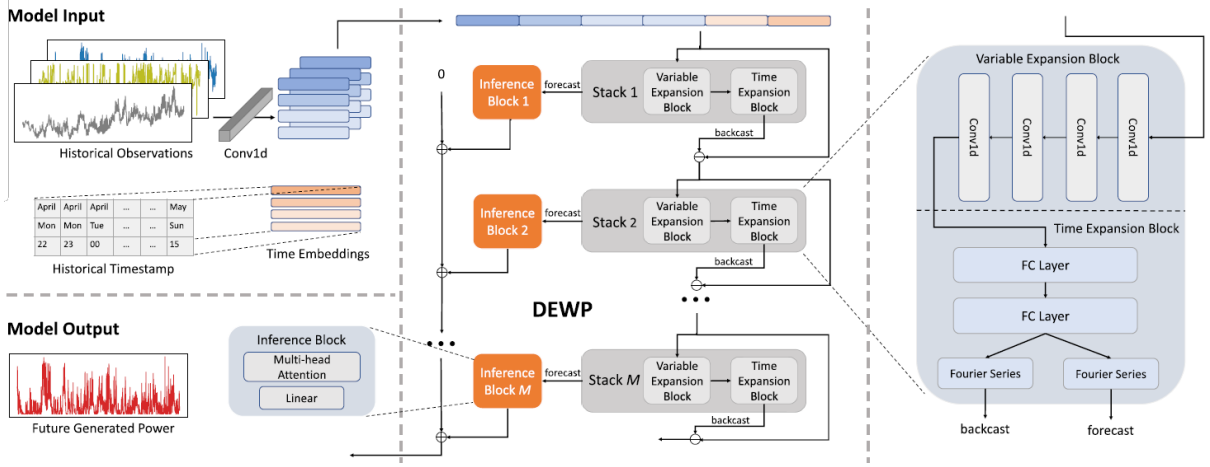


Figure 1. General WPF architecture diagram

The experimental results demonstrate that DEWP is a good solution for wind power prediction that can provide timely insights to the energy market. Generally, the electricity market is build upon twomechanisms. The first one is Day Aheadmarket, where the bulk energy necessary to cover the demand for the next day is traded on the market. The accurate WPF permits the settlement of electricity price ahead of time during the bidding and the auction process. The second mechanism is ancillary service market.

References

1. Ahmed A. Ewees, Mohammed A. A. Al-qaness, Laith Abualigah, and Mohamed Abd Elaziz. 2022. HBO-LSTM: Optimized long short term memory with heap-based optimizer for wind power forecasting. Energy Conversion and Management 268 (2022), 116022.
2. Jindong Han,Weijia Zhang, Hao Liu, and Hui Xiong. 2023. Machine learning for urban air quality analytics: A survey.arXiv:2310.09620. Retrieved from https://arxiv.org/abs/2310.09620.
3. Dan Li, Fuxin Jiang, Min Chen, and Tao Qian. 2022. Multi-step-ahead wind speed forecasting based on a hybrid decomposition method and temporal convolutional networks. Energy 238 (2022), 121981.

UDC 621.311

BIDIRECTIONAL WIRELESS POWER TRANSFER AND CONTROL METHODS IN V2G SYSTEMS

Gorodetskyi Vyktor[1], Associate Professor; Dubovyk Volodymyr[2], senior lecturer; Olenchenko Dmytro[3], student

[123]Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine

TBeyond their environmental benefits, EVs are increasingly recognized as valuable distributed energy resources (DERs) within smart grids, providing critical services such as peak shaving, frequency regulation, and voltage support. This paradigm shifts positions EVs not merely as transportation tools but as integral components of modern energy systems.

Efficient bidirectional power flow necessitates advanced power converters and sophisticated control algorithms capable of managing both active (P) and reactive (Q) power while adapting to dynamic grid conditions. Modern bidirectional charging systems operate under four-quadrant control frameworks, regulating power flowbased on grid demand and battery states. Bidirectional wireless charging systems support eight operational modes, including Grid-to-Vehicle (G2V), Vehicle-to-Grid (V2G), and Vehiclefor-Grid (V4G), each with distinct power flow directions and reactive power strategies. Wireless Power Transfer (WPT) technology enables the autonomous charging and discharging of electric vehicles (EVs) without necessitating the direct link between the vehicle and the charging station [8]. This ability is particularly advantageous for autonomous Vehicle-to-Everything (V2X) operations, allowing the charging/discharging process to commence without user intervention. The most advanced among the several inductions. This charger functions by utilizing a magnetic field generated between two air-core connected coils, operating between 80 and 90 kHz. Because of the operating frequency, power converters in wireless chargers demonstrate significant variations in composition, architecture, and control mechanisms compared to their wired counterparts.

Figure 1 provides a schematic overview of a wireless EV charging system, illustrating its core components: Primary (Grid) Side: Comprises a grid rectifier, DC/AC converter, and primary coil embedded in infrastructure (e.g., roads or parking spots). Secondary (Vehicle) Side: A secondary coil, AC/DC converter, and battery is included. The system facilitates bidirectional energy exchange via inductive coupling, eliminating the need for physical connectors while supporting G2V and V2G functionalities. This architecture underscores the synergy between user convenience and grid stability, which is critical for scalable V2G deployment.

Modern systems employ phase-shift modulation, pulsewidth modulation (PWM), and model predictive control (MPC) to regulate power flow and maintain grid stability. These approaches enable precise active and reactive power management, ensuring seamless integration with smart grid infrastructure. Moreover, integrating EVs into the power grid introduces new challenges related to grid synchronization,
communication protocols, and cybersecurity. Real-time coordination between primary and secondary controllers is essential for maintaining stable operation, while adaptive

control algorithms ensure that energy exchange remains efficient despite fluctuations in grid conditions.

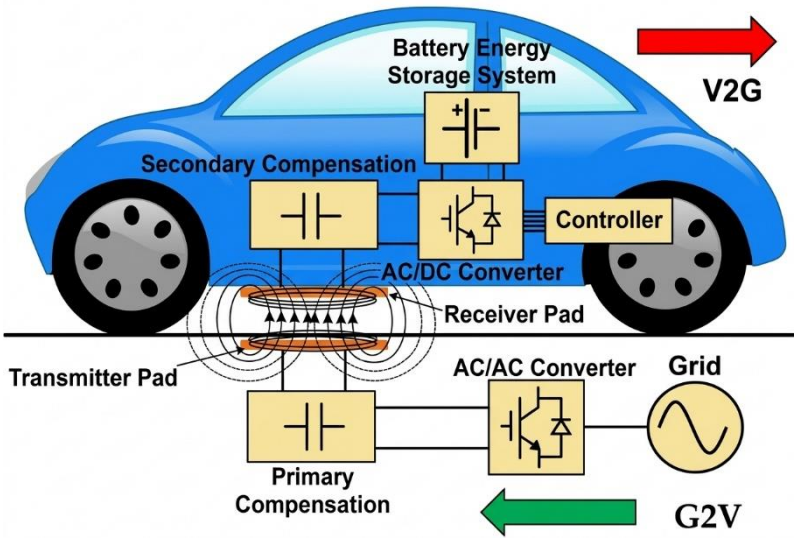


Fig. 1. Schematic diagram of a wireless electric vehicle charging system

Bidirectional power converters used in wireless chargers are designed for dual-directional operation. In a full-bridge DC/AC converter, the transistors are connected in series with antiparallel diodes. The preference for Sic MOSFETs in wireless charging systems arises from their capacity to fulfill the high-frequency operating demands and power levels. This version is concise and uses formal technical language to improve clarity. Considering this system's dual functionality, the implementation of bidirectional wireless chargers may be achieved by employing two bidirectional power converters, one on the primary side and one on the secondary side, with only one operating at any given time. When the primary-side converter is active, it functions as a rectifier, converting grid AC power to DC. The primary AC/AC converter then reconverts thisDCpower toAC. In contrast, the secondary converter's transistors are deactivated, enabling it to function exclusively as a rectifier. Fast body diodes are employed in all cases to boost system efficiency. Synchronization of Power Converters: Precise real-time coordination between the two is vital in practical implementations. To effectively counteract the impact of variable delays in the communication system between the primary and secondary sides, phase-delay techniques or statistical characterizations of the delay may be required. It is essential to account for communication delays.

References

1. A. Trivico, J. M. Gonzбlez-Gonzбlez, and J.A.Aguado, ‘‘Wireless power transfer technologies applied to electric vehicles: A review,’’ Energies, vol. 14, no. 6, p. 1547, Mar. 2021.
2. R. G. Gago, S. F. Pinto, and J. F. Silva, ‘‘G2 V and V2G electric vehicle charger for smart grids,’’ in Proc. IEEE Int. Smart Cities Conf. (ISC2), Trento, Italy, Sep. 2016, pp. 1–6.
3. B. K. Sovacool, J. Kester, L. Noel, and G. Zarazua de Rubens, ‘‘Actors, business models, and innovation activity systems for vehicle-to-grid (V2G) technology: A comprehensive review,’’ Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 131, Oct. 2020, Art. no. 109963.

УДК 621.313.32:621.318.122

МАГНІТНЕ ПОЛЕ СПРОЩЕНИХ ГЕОМЕТРИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ГЕНЕРАТОРА З ВНУТРІШНІМИ ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ

Крищук Р. С., к.т.н.

Інститут електродинаміки НАН України, м. Київ, Україна.

Генератори з постійними магнітами (ПМ) широко застосовуються у вітроенергетиці; найточніший розрахунок їх поля дають програми на основі методу скінченних елементів (МСЕ) — Ansys Maxwell, COMSOL Multiphysics, JMAG та ін. [1], проте на початковому етапі проєктування зручніше застосовувати швидші чисельно-аналітичні методи розрахунку [2–4].

На рис. 1 представлено 4 двовимірні моделі генератора з внутрішніми ПМ, побудовані в Ansys Maxwell (Magnetostatic) [1] — від повної геометрії (рис. 1, А) до спрощених (рис. 1, Б–Г), придатних для чисельно-аналітичних методів [2–4]. Поле магнітів у всіх моделях однакової величини, враховано методом еквівалентних поверхневих струмів намагніченості на бічних гранях магнітів: струм визначається як добуток намагніченості матеріалу M на висоту магніту h [3, 4].

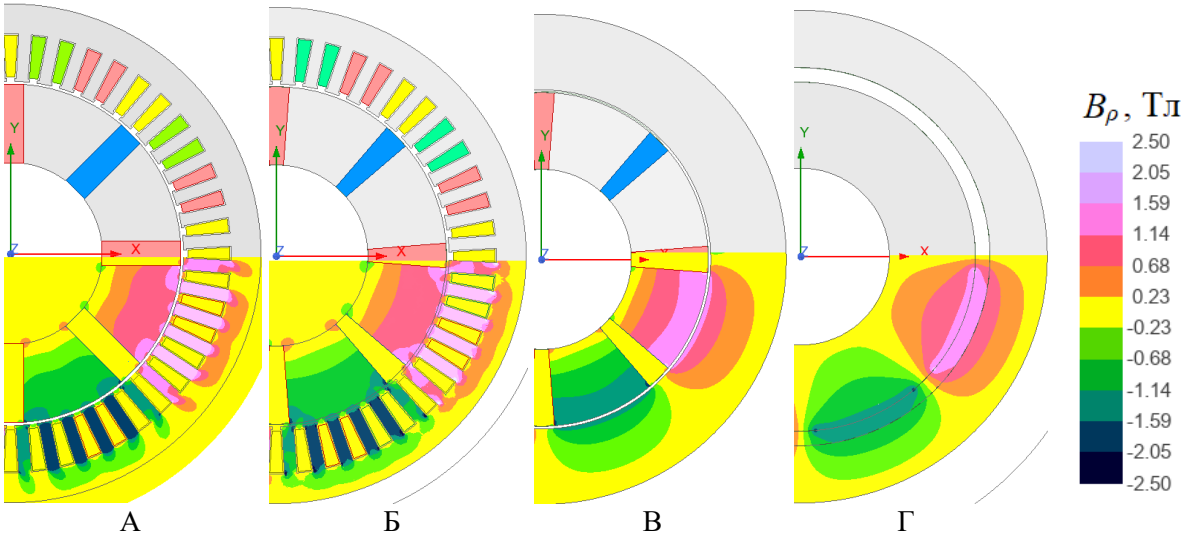


Рисунок 1. – Моделі машини та радіальна складова індукції поля.

В машинах з внутрішніми ПМ прямокутної форми (рис. 1, А) магнітна проникність ротора залежить одразу від двох координат — $\mu(\rho, \varphi)$, що ускладнює аналітичний розв'язок і вимагає чисельного розрахунку. Тому в чисельно-аналітичних методах застосовують спрощену геометрію ротора (рис. 1, Б, В), де $\mu(\varphi)$ [4]. У найпростішій моделі (рис. 1, Г) магніти в роторі відсутні: замість них — суцільний магнітопровід і еквівалентне збільшення проміжку за рахунок зменшення радіусів ротора на $(\tau h)/(4\mu_{rp} b)$, де τ — повна полюсна відстань на поверхні статора (а не відстань між магнітами в повітряному проміжку), h — висота магнітів, μ_{rp} — відносна проникність ПМ, b — радіальна ширина магнітів. Такий вибір τ дає дещо більший еквівалентний проміжок, який водночас частково компенсує відсутність зубцево-пазової структури статора в моделі Г, що зумовлює її кращу збіжність з моделлю А.

Модель Б використовується для чисельно-аналітичного методу [4], але ускладнена зубцево-пазовою зоною статора. Статор у моделях В та Г — безпазовий, а на границі проміжку задається розподіл лінійної густини трифазного струму шириною, що відповідає ширині пазів [3].

Мета роботи — порівняльний аналіз статичного магнітного поля в проміжку для 4 моделей генератора з внутрішніми ПМ (рис. 1), що відповідає режиму холостого ходу.

Для розрахунків задано радіус статора в проміжку 66 мм, проміжок 1 мм, b = 30 мм, h = 10 мм, μ_{rp} = 1,045, τ = 51,84 мм, M = 1003441 А/м. Лише в моделі А враховано насичення сталі (1008) статора й ротора. У моделях Б, В площа магнітів менша в 1,3 раза порівняно з А, тому μ_{rp} зменшена пропорційно площі (μ_{rp} = 0,804). Модель Г не має магнітів у роторі, що дозволяє задати поверхневі струми ротора лише на межі з повітряним проміжком.

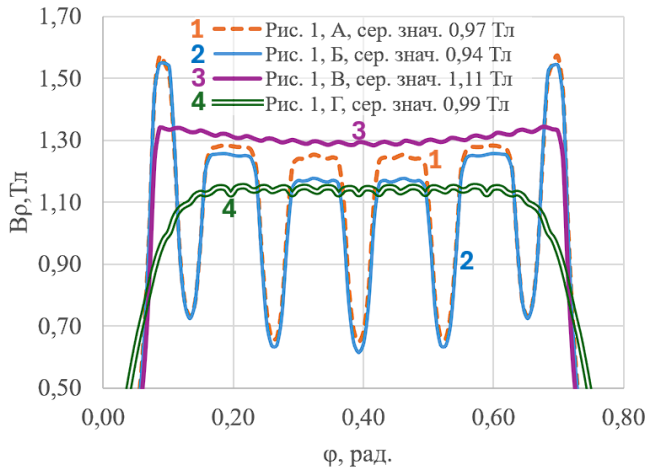


Рисунок 2. – Радіальна індукція B_ρ на поверхні статора в межах полюсної відстані.

Порівняння кривих 1–4 на рис. 2 показує, яка особливість геометрії найбільше впливає на форму поля в проміжку. Криві 1 та 2 відрізняються виключно через насичення магнітопроводу статора в моделі А. Крива 3 (модель В) на 18% перевищує середнє значення індукції кривої 2 (модель Б) через спрощену безпазову модель статора. Крива 4 (модель Г) по краях не має підйомів, оскільки поверхневі струми ротора при еквівалентному збільшенні проміжку розміщені далі від статора. За середнім значенням індукції моделі Б та Г дають найменше відхилення індукції від базової моделі А (3,4% та 1,9%), тоді як модель В — завищений рівень індукції на 14,7%, порівняно з А.

Перелік джерел посилань

1. Ansys Maxwell. Low-Frequency Electromagnetic Simulation. URL: https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-maxwell (дата звернення: 02.11.2026).

2. Chen J., Liu K., Wei D. et al. Review on Magnetic Field Analytical Methods for Permanent Magnet Machines. IEEE Access. 2026;14:87462–87482. DOI: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2026.3701256

3. Кондратенко І.П., Гребеніков В.В., Гамалія Р.В. та ін. Порівняльний аналіз чисельного та чисельно-аналітичного моделювання генераторів з постійними магнітами. Техн. електродинаміка. 2026;(3):11–20. DOI: https://doi.org/10.15407/techned2026.03.011

4. Sprangers R.L.J., Paulides J.J.H., Gysen B.L.J. et al. Magnetic Saturation in Semi-Analytical Harmonic Modeling for Electric Machine Analysis. IEEE Trans Magn. 2016;52(2):1–10. DOI: https://doi.org/10.1109/TMAG.2015.2480708

UDC 621.311

METHOD FOR SHORT-TERM LOAD FORECASTING OF CHARGING STATIONS

Shovkaliuk Maryna[1], Associate Professor; Dubovyk Volodymyr[2], senior lecturer; Levchuk Mykhailo[3], student

[123]Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine

Ultra-short-term forecasting of the aggregate load on the charging infrastructure of the aforementioned administrative district is performed. Historical load data collected during the specified month (January) are used for validation and analysis. Data from the first 29 days of the month are used to train the model, while data from the last two days are used to validate the forecasting results. Based on empirical experience, the LSTM forecasting model was configured as follows: two hidden layers, each containing 20 neurons; a learning rate set to 0.1; and forecasting results obtained after 150 training iterations. To demonstrate the advantages of the proposed method, a baseline method was established in which only historical charging station load data serve as the input variable for training the LSTM model and performing subsequent ultra-short-term load forecasting; this approach is hereinafter referred to as the "traditional LSTM-based forecasting method." In contrast, the method proposed in this paper involves feeding a two-dimensional array into the LSTM model (for both training and forecasting) that includes both charging station utilization rates and historical load data. When using deep learning-based load forecasting models, prediction results may vary from run to run due to the randomness inherent in the initial parameter setup of the neural network. Data on charging load transactions were collected for all charging stations and units directly managed by the electric utility company. The dataset comprises approximately 2 million transaction records, each containing nine fields: month, charging unit ID, station name, energy consumed, electricity cost, service fee, total transaction amount, and charging start and end times.

The peak aggregate charging load in this zone was approximately 80 kW and exhibited high volatility, resulting in a relatively high MAPE value for the forecasts. To further demonstrate the effectiveness of the proposed method in mitigating the impact of spatial distribution uncertainty on forecasting results, the method was applied to estimate electric vehicle (EV) charging load across a larger urban area. This zone comprised 69 charging stations with a peak aggregate load of approximately 140 kW; the results showed a significant reduction in MAPE—to around 0.1—thereby meeting practical engineering requirements.

To validate the proposed method, charging load data from a specific administrative district of the city were selected as the basis for analysis and forecasting. LSTM is a type of recurrent neural network that improves upon the internal structure of traditional recurrent neural networks, enabling the detection of long-term dependencies in time-series data while effectively avoiding the problems of vanishing and exploding gradients. The internal mechanism of an LSTM cell is shown in Figure 1.

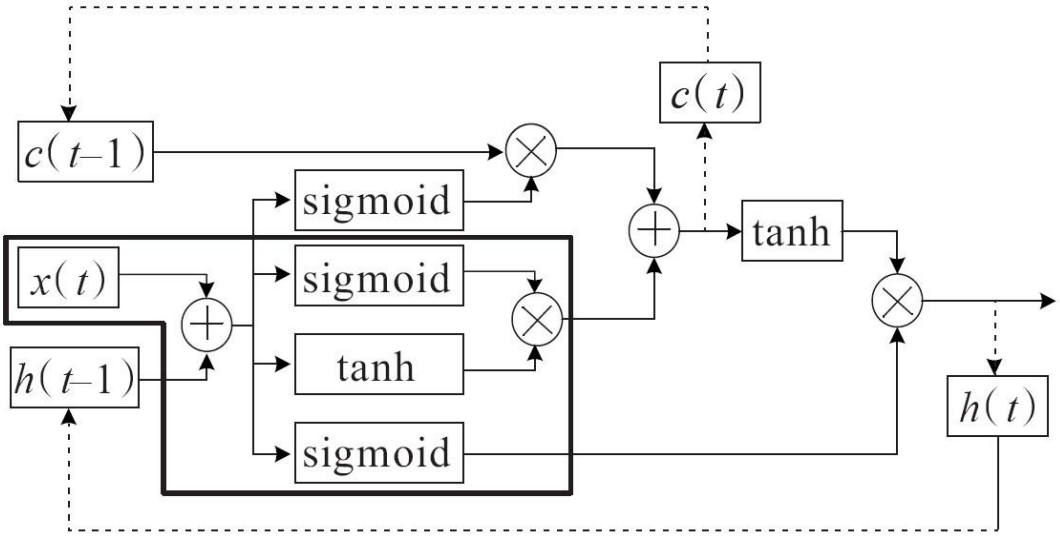


Fig. 1. The implementation principle of LSTM internal units

To eliminate the impact of spatial distribution uncertainty on the accuracy of ultra-short-term forecasting of electric vehicle charging load, a method based on the utilization rate of charging piles for electric vehicle charging load ultra-short-term forecasting is proposed. Firstly, the charging load power of each charging pile within the region is extracted from massive charging transaction data, and then quantified values of the utilization rate of charging piles are obtained through encoding. Then, the utilization rate of charging piles and charging load power data are merged to obtain training samples and test sets for long short-term memory （LSTM） neural networks , forming a deep learning model for ultra-short-term forecasting of electric vehicle charging load, with a time resolution of up to 0.5 h. Finally, the effectiveness and accuracy of the proposed method are validated in scenarios with different scales of charging load. The results indicate that compared to the unoptimized LSTM neural network load forecasting method, the proposed method achieves an increase in the average absolute percentage error of approximately 5%. This can provide significant support for the optimization operation of distribution grids under future vehicle-grid interaction.

References

1. TAN Xiao, CHEN Jie, CAO Jingying, et al. Application and comparison of logistic regression and support vector machine in condition assessment of cable aging condition [J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(5):113-121.

2. NIU Mutong, LIAO Kai, YANG Jianwei,et al.Multi-timescale electric vehicle load forecasting model considering seasonal characteristics [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(5): 74-85.

3. LI Yuzhi, LIU Xiaoliang, XING Fangfang, et al. Daily peak load prediction based on correlation analysis and Bi-directional long short-term memory network [J]. Power System Technology, 2021, 45(7):2719-2730.

УДК 621.311:504.06

ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ІНТЕГРАЦІЇ СОНЯЧНОЇ ТА ВІТРОВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ В РОЗПОДІЛЕНІ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Федірко М. М., к.е.н., доцент.

Західноукраїнський національний університет (ЗУНУ), м. Тернопіль, Україна.

Перехід до відновлюваних джерел енергії є одним із важливих напрямів підвищення екологічної безпеки та стійкості енергетичної системи України. Особливе значення має поєднання сонячних електростанцій (СЕС) і вітрових електростанцій (ВЕС) у розподілених системах електропостачання. Така інтеграція дає змогу наблизити виробництво електроенергії до споживача, зменшити навантаження на централізовану мережу та частково замістити генерацію на викопному паливі. Водночас оцінювати екологічність цих технологій потрібно не лише за відсутністю прямих викидів під час виробництва електроенергії, а й з урахуванням повного життєвого циклу обладнання [1].

Метою роботи є визначення основних екологічних переваг і ризиків спільного використання сонячної та вітрової генерації в розподілених електричних мережах, а також обґрунтування заходів для зменшення негативного впливу на довкілля.

Однією з головних переваг комбінованої генерації є скорочення викидів діоксиду вуглецю, оксидів азоту та сірки завдяки зменшенню потреби у виробництві електроенергії на теплових електростанціях. Сонячна генерація зазвичай активніша вдень, тоді як вітрові ресурси можуть бути доступними в інші години доби та сезони. Взаємне доповнення цих джерел сприяє більш рівномірному надходженню електроенергії та знижує потребу у використанні маневрових потужностей на викопному паливі. Розподілена генерація також може підвищувати надійність локального електропостачання за умови належного проєктування й керування мережею [2].

Разом із перевагами використання СЕС має низку екологічних обмежень. Розміщення великих сонячних електростанцій може потребувати значних земельних площ, зокрема сільськогосподарських угідь, а будівництво інженерних конструкцій здатне змінювати стан ґрунтового покриву. Окремою проблемою є поводження з відпрацьованими фотоелектричними модулями: без належного збирання, сортування та перероблення їх накопичення створює ризик забруднення довкілля. Додаткової уваги потребують акумуляторні системи накопичення енергії, які використовують для компенсації нерівномірності генерації. Їх виробництво та утилізація пов’язані з використанням хімічних матеріалів і потребують безпечних технологічних рішень.

Вітроенергетичні установки також можуть створювати локальні екологічні ризики. До них належать шумовий вплив, зміна умов існування окремих видів тварин, а також небезпека зіткнення птахів і кажанів із лопатями турбін. Важливим питанням залишається утилізація лопатей, виготовлених із композитних матеріалів, перероблення яких є технологічно складним. Тому під час вибору майданчиків для ВЕС необхідно враховувати природоохоронні обмеження, шляхи міграції птахів і близькість житлової забудови [3].

Зменшити негативний вплив комбінованих енергетичних систем можна завдяки комплексному плануванню та впровадженню принципів циркулярної економіки. Перспективним рішенням для сонячної генерації є агровольтаїка — поєднання виробництва електроенергії з веденням сільського господарства на одній земельній ділянці. Це дає змогу ефективніше використовувати територію та зменшувати конкуренцію між енергетичними й аграрними потребами [4]. Для вітроенергетики важливими є попередня оцінка впливу на біорізноманіття, моніторинг стану фауни та застосування технічних засобів, які дають змогу зменшувати ризики для птахів і кажанів. Для обох типів установок необхідно передбачати збір, повторне використання та перероблення компонентів після завершення строку експлуатації.

Висновки. Спільна інтеграція сонячної та вітрової генерації є перспективним напрямом екологізації розподілених систем електропостачання. Її основний позитивний результат полягає у скороченні викидів від традиційної генерації та підвищенні стійкості локальних енергосистем. Однак цей ефект буде повноцінним лише за умови врахування впливу обладнання протягом усього життєвого циклу. Для цього необхідно вдосконалювати планування розміщення енергооб’єктів, забезпечувати екологічний моніторинг, розвивати перероблення відпрацьованих модулів, акумуляторів і композитних матеріалів. Отже, екологічна ефективність розподіленої генерації залежить не тільки від обсягів виробленої чистої електроенергії, а й від відповідального управління ресурсами та відходами.

Перелік джерел посилань

1. Кудря С. О. Відновлювані джерела енергії : підручник. Київ : Інститут відновлюваної енергії НАНУ, 2020. 392 с.
2. Каплун В. В. Розподілена генерація в локальних електричних системах з відновлюваними джерелами енергії. Енергетика та автоматика. 2022. № 4. С. 15–28.
3. Басан О. В. Екологічні ризики вітроенергетичних установок та методи їх мінімізації. Екологічні науки. 2023. Т. 3, № 42. С. 102–109.
4. Агровольтаїка як інструмент сталого землекористування при розгортанні СЕС в Україні / Т. Шевченко та ін. Вісник НУБіП України. Серія: Техніка та енергетика. 2025. № 2(112). С. 67–76.

UDC 662.767.2

ASSESSMENT OF GRAPE BIOMASS METHANE POTENTIAL FOR THE DESIGN OF WINERY-BASED BIOGAS SYSTEMS

Witaszek K.[1*]; Kupryaniuk K.[1]; Dudnyk A.[2]; Czekała W.[1]

[1]Department of Biosystems Engineering, Poznań University of Life Sciences, Wojska Polskiego 50, 60-627 Poznań, Poland

[2]Department of Automatics and Robotic Systems, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, 03-041 Kyiv, Ukraine

** Corresponding author: kamil.witaszek@up.poznan.pl*

The integration of anaerobic digestion technology into winery operations offers opportunities for renewable energy generation through the utilization of grape biomass.

This research investigates the biomethane potential of three grape varieties cultivated in the Zielona Góra region of Poland: Johaniter (white grapes), Riesling (green grapes), and Portugieser (purple grapes). The experimental work included physicochemical characterization of the substrates, covering dry matter, organic dry matter, pH, electrical conductivity, and ammonium nitrogen concentration. Methane production was determined through laboratory-scale batch digestion experiments performed under mesophilic conditions, following the procedures described in DIN 38414/S8 and VDI 4630. The highest methane yield was recorded for Riesling, reaching 52.87 $m^3 \cdot Mg^{-1}$ of fresh matter, whereas Portugieser achieved 48.37 $m^3 \cdot Mg^{-1}$. The lowest methane production was observed for Johaniter, with a yield of 34.10 $m^3 \cdot Mg^{-1}$. These findings demonstrate considerable variation in the energy potential of the investigated grape varieties, indicating that feedstock characteristics should be considered when estimating biogas production capacity. The obtained results provide a basis for preliminary assessments of biogas plant sizing and substrate management in winery-integrated energy systems. Further investigations will focus on evaluating the technical and economic feasibility of these solutions using operational data from commercial wineries and biogas facilities.
Keywords: Anaerobic digestion, Grape biomass, Methane yield

УДК 631.24.243

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СТІЙКОСТІ УКРАЇНИ НА ОСНОВІ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ГЕНЕРАЦІЇ ЕНЕРГІЇ З НИЗЬКОРЕАКЦІЙНИХ ПАЛИВ

Федорейко В. С., д.т.н., професор

Центр енергоефективних технологій ТНПУ ім. В. Гнатюка Тернопільський національний педагогічний університет імені Володимира Гнатюка, Україна

Вітчизняна енергетична галузь тривалий час перебуває в стані функціональної турбулентності викликаної зовнішньою агресією. Енергетичний баланс країни проходить глибоку трансформацію і вимагає пошуку нестандартних підходів для забезпечення споживачів енергетичними ресурсами з урахуванням регіональних викликів воєнного стану.

Одним із пріоритетів виходу з кризи є впровадження системи розподільної генерації шляхом децентралізації енергетичних структур на основі розширення ролі зеленої відновлювальної енергії.

На основі засобів розподільної генерації може створюватися нова енергетична інфраструктура держави з регіональною юрисдикцією. Створення і експлуатація об'єктів такої енергетики вимагає значно менших затрат порівняно з дороговартісною великою генерацією, а також значно зменшить навантаження на розподіл і передачу енергії. Адже існуючі нині реальні втрати при передачі та розподілі значно перевищують нормативні, що призводить до регулярного підвищення тарифів.

Наближення генерації до споживачів вирішує одночасно цілий ряд проблем технічного, економічного та екологічного характеру. Особливо це характерно для ситуації, коли виробництво і споживання знаходяться в одному юридичному

полі, що унеможливлює традиційні конфлікти інтересів. Це, в свою чергу, є значним стимулом для створення в майбутньому передумов розвитку віртуальної генерації, яка в значній мірі підсилить стійкість енергосистеми в цілому.

Описані тенденції є світовим трендом і направлені на реалізацію стратегії глобальної перебудови енергетики по концепції «Smart Grid».

Нами створено методологічні основи, технології та обладнання для забезпечення децентралізованої генерації енергії та підвищення енергетичної стійкості України шляхом енергоефективного екологічно безпечного використання нестандартизованих відновлюваних низькореакційного твердого палива біологічного походження, спалювання якого в наявних енергетичних установках неефективне, екологічно небезпечне або принципово неможливе.

Розроблено високоефективну біоресурсну технологію термохімічної деструкції та спалювання в струменево-вихрових біотеплогенераторах сумішевої важкосипучої біомаси сільськогосподарського походження, різної за фракційним складом та вологістю до 40%, яка щорічно накопичується у великій кількості після переробки кукурудзи, соняшника, пшениці тощо.

З використанням методів імітаційного та чисельного 3D моделювання, а також шляхом промислових досліджень, визначено оптимальні режими процесів термохімічної деструкції та струйно-вихрового горіння біопалива в біотеплогенераторах, високі показники стабільності безперервної роботи яких при використанні біомаси з недетермінованими теплофізичними властивостями забезпечуються створеною системою автоматичного керування процесами підготовки, дозування та спалювання, заснованою на використанні елементів штучного інтелекту.

Встановлена потужність впроваджених за останні 11 років біотеплогенераторів складає понад 51.0 МВт, що забезпечило економічний ефект понад 860 млн. грн.

УДК 621.311

ГІБРИДНІ МІКРОМЕРЕЖІ ТА БАГАТОРІВНЕВЕ РЕЗЕРВУВАННЯ ЯК ОСНОВА ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СТІЙКОСТІ КРИТИЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

Мейш Ю. А., д. техн. н., професор Дащенко М.Р., студент

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

Робота лікарень, водоканалів, систем теплопостачання, зв'язку й транспорту залежить від електроенергії, а відмова будь-якого з цих об'єктів спричиняє каскадні наслідки. Директива (ЄС) 2022/2557 зобов'язує критичні суб'єкти одинадцяти секторів, зокрема енергетики, охорони здоров'я та питного водопостачання, оцінювати ризики порушення основних послуг і вживати заходів для підвищення стійкості [1]. В Україні ця проблема стала особливо гострою через систематичні атаки на енергосистему з 2022 р., тому український досвід є масштабною перевіркою підходів до резервування в реальних умовах [2].

Мета роботи – систематизувати підходи до резервування та автономного електропостачання критичних об'єктів і визначити умови їх ефективності.

Резервування доцільно розглядати на кількох рівнях. На рівні мережі це незалежні живильні лінії від різних підстанцій, кільцеві схеми й автоматичне введення резерву. Проте атаки чи негода можуть одночасно вивести з ладу кілька ліній (відмова зі спільної причини), тому мережеве резервування слід доповнювати локальними джерелами [3]. На рівні об'єкта застосовують принцип N+1 або 2N для генераторів, джерел безперебійного живлення (ДБЖ) і розподільних пристроїв, а критичні навантаження відокремлюють від некритичних. Резервування палива й логістики потрібне тому, що генератор надійний лише настільки, наскільки надійне постачання палива [3; 4]. Організаційне резервування охоплює запасні частини, мобільні установки та підготовлений персонал: саме доступ до запасних частин визначав швидкість відновлення енергосистеми України [5].

Дизельні генератори швидко запускаються, але залежать від палива, створюють шум і викиди та забезпечують лише обмежену в часі автономність [3; 4]. Накопичувачі енергії дають безперервний перехід на резервне живлення; для навантажень лікарні вони підвищують стійкість гібридної мікромережі, хоча й збільшують вартість енергії [6]. Тому ємність накопичувача слід визначати за потрібним часом автономної роботи критичного навантаження.

Найперспективнішим рішенням є гібридна мікромережа, що поєднує локальну генерацію, накопичувачі та контролер, здатний працювати в острівному режимі. За даними NREL, мікромережа з фотоелектричними панелями, акумуляторами й дизельними генераторами має вищу надійність і на 19–35 % нижчу чисту приведену вартість, ніж система лише з дизельними генераторами [7]. Моделювання 72-годинного відключення після землетрусу показало, що доступність критичних послуг лікарні зростає приблизно з 48 % (лише дизельний генератор) до 87 % (фотоелектрична генерація, накопичувач і дизельний генератор) [4]. Ці результати отримано для конкретних регіонів, але вони узгоджено свідчать: поєднання кількох джерел із керуванням навантаженням надійніше за будь-яке окреме джерело.

В умовах атак Україна перейшла від централізованої моделі до розосереджених джерел електро- і теплопостачання з акумуляторами, резервною генерацією та локальними енергомережами [2]. Водночас децентралізація сама по собі не усуває вразливості: розосереджені об'єкти потребують фізичного захисту, кібербезпеки та запасного обладнання [2; 3].

На основі аналізу можна сформулювати практичні рекомендації: 1) класифікувати навантаження за критичністю й визначити для кожного потрібний час автономності [1]; 2) проєктувати систему з урахуванням одночасної втрати всіх мережевих вводів і перевіряти роботу в острівному режимі [3]; 3) поєднувати різні джерела генерації з накопичувачами, а не покладатися на один ланцюг постачання палива [4; 7]; 4) підтримувати запаси палива, запасних частин і мобільних установок [3; 5]; 5) регулярно випробовувати автоматичне введення резерву.

Отже, резервування критичних об'єктів має охоплювати не лише дублювання обладнання, а й мережі, паливну логістику та організаційну готовність. Гібридні мікромережі з керованою генерацією, накопичувачами та

пріоритезацією навантажень забезпечують вищу стійкість, ніж резервування лише дизельними генераторами [4; 6; 7]. Подальші дослідження доцільно спрямувати на техніко-економічну оптимізацію часу автономності та показники стійкості, придатні для регуляторного застосування [1].

Перелік джерел посилань

1. Directive (EU) 2022/2557 of the European Parliament and of the Council of 14 December 2022 on the resilience of critical entities and repealing Council Directive 2008/114/EC. Official Journal of the European Union. 2022. L 333. P. 164–198.
2. Dispersal Saving Ukraine from Russia's Winter Blitz. Center for European Policy Analysis (CEPA). URL: https://cepa.org/article/dispersal-saving-ukraine-from-russias-winter-blitz/
3. Responding to Russian Attacks on Ukraine's Power Sector. Center for Strategic and International Studies (CSIS). 2022. URL: https://www.csis.org/analysis/responding-russian-attacks-ukraines-power-sector
4. Design of Microgrid-Based Resilience Solutions to Improve Public Health Impacts of Earthquake-Induced Power Outages. 2025. URL: https://avesis.gazi.edu.tr/yayin/1e5faafd-8829-4653-91c2-8dbce0f5fcf9/design-of-microgrid-based-resilience-solutions-to-improve-public-health-impacts-of-earthquake-induced-power-outages
5. Ukraine's Wartime Grid Offers Ten Lessons in Energy Resilience, IEA Says. bne IntelliNews. URL: https://www.intellinews.com/ukraine-s-wartime-grid-offers-ten-lessons-in-energy-resilience-iea-says-428304/
6. A Comparison of Grid-Connected Local Hospital Loads with Typical Backup Systems and Renewable Energy System Based Ad Hoc Microgrids for Enhancing the Resilience of the System. Energies. 2023. Vol. 16, No. 4. Art. 1918.
7. Resilience and Economics of Microgrids with PV, Battery Storage, and Networked Diesel Generators. National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2021. URL: https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/78837.pdf

УДК 621.436:621.313.322

ЕНЕРГЕТИЧНІ ПОКАЗНИКИ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНОЇ УСТАНОВКИ ЗА РІЗНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ТА ЯКІСТЬ НАПРУГИ В АВТОНОМНОМУ РЕЖИМІ

Горобець Ю.Г., аспірант; Горобець В.Г., д.т.н., проф.,
Національний університет біоресурсів і природокористування України

Метою роботи є оцінювання енергетичних показників дизель-генераторної установки (ДГУ) за навантаження 50, 75 і 100 % на основі паспортних даних та аналіз параметрів якості напруги й струму ДГУ за результатами вимірювань аналізатором при малому та великому навантаженні.

Дизель-генераторні установки застосовують як резервні та аварійні джерела живлення, зокрема для закладів освіти, а енергоефективність їх використання визначається питомою витратою палива, що залежить від навантаження та частоти обертання двигуна [1]. Об'єктом дослідження є ДГУ Altaş AJ-ELLA 90 (Туреччина) з двигуном Ella E4105ZLD1: потужність резервна 90 кВА / 72 кВт, основна 82 кВА / 66 кВт, 230/400 В, 50 Гц, cos φ = 0,8, механічний регулятор частоти обертання, бак 160 л [2]. Паспортна витрата палива становить 8,9; 13,5 і 18,0 л/год за навантаження 50, 75 і 100 %.

Для навантаження з коефіцієнтом k активну та повну потужності й фазний струм визначали за співвідношеннями, а енергетичні показники – через потужність, підведену з паливом:

$$P = k\,P_{\text{ном}},\quad S = \frac{P}{\cos\varphi},\quad I = \frac{S}{\sqrt{3}\,U_{\text{л}}},\quad P_{\text{пал}} = \frac{B\,\rho\,Q_{\text{н}}}{3{,}6},\quad \eta = \frac{P}{P_{\text{пал}}}, \tag{1}$$

$$b_{\text{г}} = \frac{1000\,B\,\rho}{P},\quad w_{\text{л}} = \frac{P}{B},\quad t_{\text{б}} = \frac{V_{\text{б}}}{B},\quad P_{\text{втр}} = P_{\text{пал}} - P, \tag{2}$$

де B – об'ємна витрата палива, л/год; ρ – густина дизельного палива, кг/л; $Q_{\text{н}}$ – нижча теплота згоряння, МДж/кг; $b_{\text{г}}$ – питома масова витрата, г/(кВт·год); $w_{\text{л}}$ – енергія з 1 л палива, кВт·год/л; $t_{\text{б}}$ – тривалість роботи на повному баку $V_{\text{б}}$, год; $P_{\text{втр}}$ – втрати, кВт. Прийнято ρ = 0,84 кг/л, $Q_{\text{н}}$ = 42,6 МДж/кг, $P_{\text{ном}}$ = 66 кВт (основна потужність), $S_{\text{ном}}$ = 82 кВА. Результати наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Енергетичні показники ДГУ за паспортною витратою палива

Показник	**50 %**	**75 %**	**100 %**
P, кВт	33,0	49,5	66,0
I, A (cos φ = 0,8)	59,2	88,8	118,4
B, л/год	8,9	13,5	18,0
$P_{\text{пал}}$, кВт	88,5	134,2	178,9
η, %	37,3	36,9	36,9
$b_{\text{г}}$, г/(кВт·год)	227	229	229
$w_{\text{л}}$, кВт·год/л	3,71	3,67	3,67
$t_{\text{б}}$, год	18,0	11,9	8,9
$P_{\text{втр}}$, кВт	55,5	84,7	112,9

Розрахунок за формулами (1), (2); η залежить від прийнятих ρ і $Q_{\text{н}}$.

За паспортними даними ККД практично не змінюється з навантаженням (37,3 % за 50 % і 36,9 % за 75 та 100 %), енергія з 1 л палива змінюється приблизно на 1 %, а витрата палива зростає пропорційно потужності. Частка втрат залишається близько 63 % енергії палива, що потрібно враховувати під час вибору охолодження й вентиляції приміщення. Автономність на повному баку становить 18,0; 11,9 і 8,9 год, а вироблена енергія майже однакова (587–593 кВт·год). Якщо відсотки відносити до резервної потужності 72 кВт, ККД становить 40,2–40,7 %, а питома витрата – 208–210 г/(кВт·год); база відліку навантаження для паспортних значень потребує уточнення. Три паспортні точки не описують ККД на малих навантаженнях і потребують вимірювань.

Параметри напруги й струму ДГУ реєстрували аналізатором якості електроенергії (табл. 2; рис. 1); якість напруги дизель-генераторних установок за нелінійного й несиметричного навантаження розглянуто в [3], а моніторинг якості електропостачання – в [4]. Показання знято з екрана приладу, а в серії виділено два рівні навантаження: мале ($S \approx 29$–34 кВА) та велике ($S \approx 66$–71 кВА). Режим, що однозначно відповідав би 75 %, не виявлено, а віднесення режимів до 50/75/100 % потрібно виконати за протоколом експерименту.

Таблиця 2 – Параметри ДГУ за малого та великого навантаження

Параметр	**Мале**	**Велике**
Частота f, Гц	50,89…51,53	49,55…50,06
Лінійна напруга $U_{\text{л}}$, В	394…411	397 / 417 / 404

Несиметрія $U_л$, %	0,8–1,9	2,7
Фазні струми, А	32…68	82…121
Струм нейтралі I_N, А	16,0…40,7	30,9…33,4
Крива напруги	майже синусоїдальна	спотворена

Мале навантаження: ≈ 36–42 % *S*; велике: ≈ 81–86 % *S* (Prime).

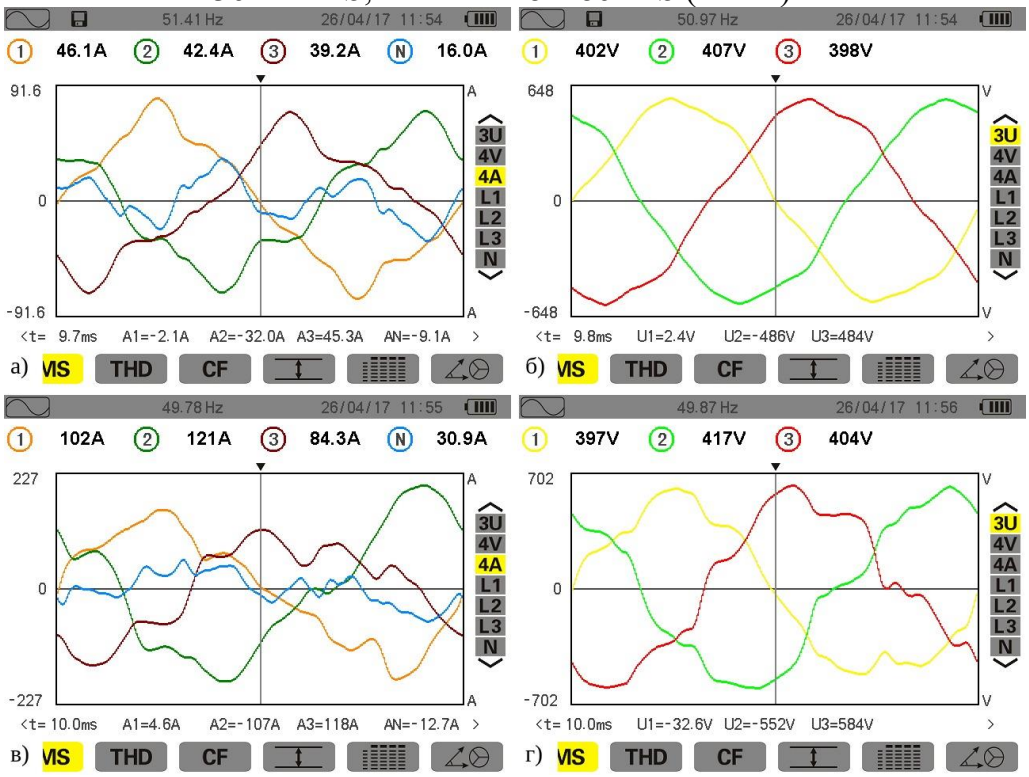


Рис. 1. Осцилограми аналізатора: мале навантаження – струми (а) та лінійні напруги (б); велике навантаження – струми (в) та лінійні напруги (г)

Із зростанням навантаження частота знижується з 51,4–51,5 до 49,6–50,1 Гц, що відповідає статичній характеристиці механічного регулятора. Для ізольованих систем EN 50160 передбачає межі ±2 % (49–51 Гц) для 95 % тижневого інтервалу [5], тож 51,4–51,5 Гц за малого навантаження виходять за ці межі; висновок про відповідність потребує реєстрації протягом не менше тижня та перевірки чинної редакції стандарту. Діючі напруги лишаються в межах 230/400 В ±10 %, але за великого навантаження зростають несиметрія лінійних напруг (до 2,7 %) і спотворення кривої, що узгоджується з впливом нелінійних струмів на внутрішній опір альтернатора. Струм фази L2 (120–121 А) сягає номінального Prime-струму (118,4 А) за сумарного навантаження ≈ 84–86 % $S_{ном}$, тобто несиметрія обмежує допустиму потужність ДГУ сильніше, ніж сума потужностей.

Висновок. За паспортними даними ККД ДГУ Altaş AJ-ELLA 90 становить 36,9–37,3 % за навантаження 50–100 % (питома витрата 227–229 г/(кВт·год)), а запас палива забезпечує 8,9–18,0 год роботи; ці значення залежать від прийнятих ρ, $Q_н$ і бази відліку навантаження. За вимірюваннями, зі зростанням навантаження частота знижується, а несиметрія й спотворення напруги зростають; обмежувальним фактором стає струм найбільш навантаженої фази. Для остаточних висновків потрібні тривала реєстрація та вимірювання витрати палива.

Перелік джерел посилань
1. Iwański G., Bigorajski Ł., Koczara W. Speed control with incremental algorithm of minimum fuel consumption tracking for variable speed diesel generator. Energy Conversion and Management. 2018.
2. Altaş. Дизель-генераторна установка AJ-ELLA 90: технічні характеристики (паспорт установки).
3. Niwas R., Singh B. Solid-state control for reactive power compensation and power quality improvement of wound field synchronous generator-based diesel generator sets. IET Electric Power Applications. 2015. Vol. 9, No. 6. P. 397–404. DOI: https://doi.org/10.1049/iet-epa.2014.0159.
4. Павленко В. М., Петренко А. В., Мартинюк Л. В., Бунтов М. І., Афінович С. Г. Семантична модель доступу до даних моніторингу якості електричної енергії в автоматизованих інформаційно-вимірювальних системах. Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. 2026. № 2 (28). С. 74–79. DOI: https://doi.org/10.20998/2413-4295.2026.02.10.
5. ДСТУ EN 50160. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загального призначення.

УДК 332.365

ПЕРСПЕКТИВНІ НАПРЯМИ РОЗВИТКУ АГРОФОТОВОЛЬТАЇКИ В УКРАЇНІ ТА СВІТІ

Коваленко Л.Р. к.т.н., доцент; Коваленко О.І. к.т.н., доцент, Фесенко О.В., аспірант

Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного, м. Запоріжжя, Україна

Сучасний агропромисловий сектор у всьому світі стикається із безпрецедентними викликами, зумовленими глобальними кліматичними змінами, деградацією земельних ресурсів та зростаючою потребою в підвищенні енергоефективності. Одним із найбільш перспективних технологічних рішень є впровадження систем агрофотовольтаїки (Agri-PV). Ця технологія передбачає синергетичне поєднання установок відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) та традиційного сільського господарства в межах однієї земельної ділянки. Замість класичної жорсткої конкуренції за землекористування між енергетичним та продовольчим секторами, Agri-PV створює нову парадигму взаємовигідного співіснування, що дозволяє підвищити загальну ефективність використання площі земної поверхні на 60-70% порівняно з монокультурними господарствами чи традиційними наземними сонячними електростанціями [1, 2].

Технологічна суть агрофотовольтаїчних рішень полягає в інтеграції та піднятті фотоелектричних модулів (ФЕМ) на спеціальних опорних конструкціях на висоту до 3 метрів над рівнем поля (залежно від специфіки вирощуваних агрокультур та використовуваної сільськогосподарської техніки) [2]. Міжнародні кейс-стаді яскраво демонструють багатофункціональність та високу окупність такого підходу. Використання на малинових плантаціях у Нідерландах, напівпрозорі кристалічні сонячні панелі успішно замінюють дорогі поліетиленові плівкові тунелі. Пропускна здатність 25-33% сонячного світла, що

є цілком достатнім для вегетації, але водночас надійно захищають делікатні ягоди від злив, граду та перегріву. При цьому середня температура під навісами є на 5°С нижчою, ніж у стандартних плівкових теплицях, що створює сприятливі умови для збирачів врожаю. У Німеччині аналогічні навіси потужністю 258 кВт інтегровані у яблуневі сади, де вони захищають дерева від погодних аномалій, а й повністю забезпечують енергією систему мікрокрапельного зрошення та холодильні склади тривалого зберігання фруктів. У посушливих регіонах Китаю затінення від фотопанелей дозволило зменшити випаровування вологи з ґрунту на 30-40% [3]. Для України впровадження Agri-PV має стратегічне значення для повоєнного відновлення АПК та зеленної трансформації енергосистеми. Перший вітчизняний пілотний проєкт «Solar Smart Energy» потужністю 230 кВт був успішно реалізований Харківським енергетичним кластером на базі СТОВ «Україна» у Дергачівському районі. Порівняльні показники ефективності технології Agri-PV наведено на рисунку 1.

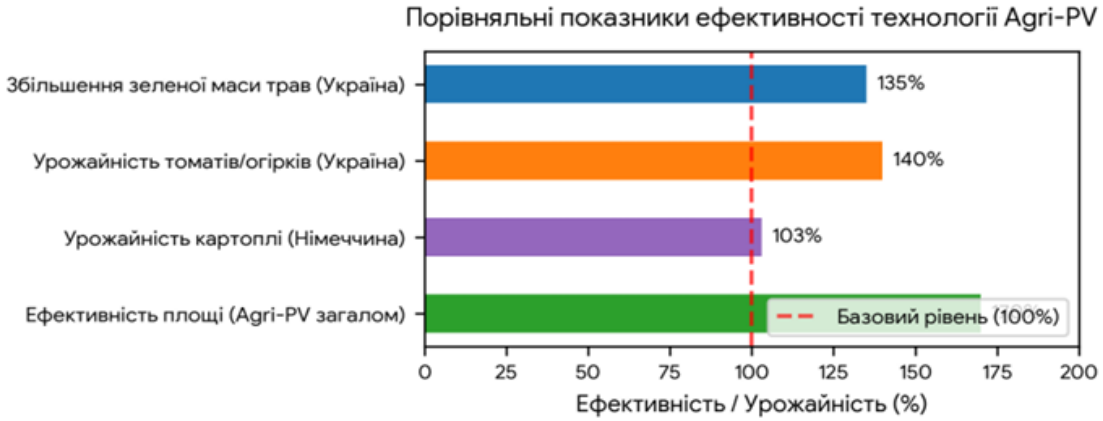


Рис. 1. Діаграма порівняльних показників ефективності та приросту врожайності за умов застосування Agri-PV систем

Результати досліджень підтвердили потенціал технології в українських кліматичних реаліях. Сформований під панелями мікроклімат (затінення у зенітні години та утримання тепла вночі) стабілізував температурний режим ґрунту, що дозволило суттєво заощадити на штучному зрошенні, оскільки рослинам у денний час достатньо ранкового конденсату, акумульованого під конструкціями СЕС. На практиці урожайність томатів та огірків під ФЕМ зросла на 40%, а період їх активного плодоношення подовжився на один місяць. Обсяг зеленої маси кормових трав збільшився на 35%. Завдяки синергії двох видів господарювання загальна прибутковість підприємства зросла майже вдвічі, що скоротило термін повернення інвестицій у СЕС із базових 5 років до 3 років [3, 4]. Таким чином, масштабування агрофотовольтаїки є дієвим інструментом підвищення конкурентоспроможності національного агробізнесу, захисту довкілля та зміцнення локальної енергетичної незалежності громад.

Перелік джерел посилань

1. SolarPower Europe (2021): Agrisolar Best Practices Guidelines Version 1.0. URL: https://solargrazing.org/wp-content/uploads/2021/06/SPE-Agrisolar-Best-Practices-Guidelines.pdf (дата звернення: 02.11.2026).

2. Агрофотовольтаїка: підвищення ефективності землекористування: огляд. Офіційний сайт компанії ERC Ukraine. URL: https://erc.ua/erc-reviews/20745/agrofotovoltayikapidvishchennia-efektivnosti-zemlekoristuvannia/ (дата звернення: 02.11.2026).
3. Під сонячними панелями виросло на 40% більше овочів. Agro Times: діловий ресурс аграріїв України. URL: https://agrotimes.ua/ovochi-sad/pid-sonyachnymy-panelyamyvyroslo-na-40-ovochiv/ (дата звернення: 12.12.2025).
4. Ференц В. І. Ефективність використання агрофотовольтаїки. *Відновлювана енергетика*. 2023. № 4(75). С.55-63. DOI: https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.4(75).55-63

УДК 621.311.243:621.355

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГОБАЛАНСУ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ГІБРИДНОЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СИСТЕМИ З НАКОПИЧУВАЧЕМ ЕНЕРГІЇ В УМОВАХ ТРИВАЛИХ ВІДКЛЮЧЕНЬ

Маланчук М. С., студент
Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

В умовах дефіциту потужності в Об'єднаній енергетичній системі України та частих пошкоджень розподільчих мереж критичної актуальності набуває впровадження децентралізованих рішень на базі відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Інтеграція гібридних сонячних фотоелектричних систем (СФЕС) із літій-залізо-фосфатними накопичувачами енергії ($LiFePO_4$ BESS) формує основу для енергетичної стійкості автономних мікромереж (microgrids) [1, 2]. Специфічним викликом для України є осінньо-зимовий період: через скорочення світлового дня та хмарність добова інсоляція падає у 4–6 разів (з 6,5 до 1,0 кВт·год/кВт на день), а зовнішнє живлення регулюється детермінованими графіками (4/2, 7/2) або аварійними блекаутами (24+ год). За таких умов класичні методики розрахунку мікромереж, орієнтовані на максимізацію власного споживання (self-consumption) за стабільної мережі, стають неефективними, що вимагає математичного моделювання балансу потужності, процесів деградації BESS та алгоритмів управління попитом (Demand Side Management, DSM) [2, 3].

При знеструмленні мережі 0,4 кВ система ізолюється за допомогою автоматичного введення резерву (ATS), а гібридний інвертор переходить із режиму веденого джерела струму (Grid-Following) у режим формування локальної мережі (Grid-Forming) на базі droop-контролю напруги та частоти. Рівняння миттєвого балансу активної потужності в автономному режимі (при потужності зовнішньої мережі $P_{Grid}(t) = 0$) *має вигляд:*

$$P_{PV}(t) + P_{dis}(t) \cdot \eta_{inv} = P_{Load}(t) + [P_{ch}(t) / \eta_{inv}] + P_{loss}(t), \quad (1)$$

де $P_{PV}(t)$ – потужність фотоелектричного масиву; $P_{Load}(t)$ – навантаження; $P_{ch}(t)$, $P_{dis}(t)$ – потужність заряду/розряду BESS; η_{inv} – ККД інвертора (0,95–0,97); $P_{loss}(t)$ – внутрішні втрати. Динаміка стану заряду (State of Charge, SoC) накопичувача визначається рекурентним рівнянням:

$$SoC(t) = SoC(t - \Delta t) + [\eta_{ch} \cdot P_{ch}(t) \cdot \Delta t / C_{batt}(t) - P_{dis}(t) \cdot \Delta t / (\eta_{dis} \cdot C_{batt}(t))] - \sigma \cdot \Delta t, \quad (2)$$

де η_{ch}, η_{dis} – ефективність заряду/розряду (круговий ККД $LiFePO_4$ – 94–96 %); $C_{batt}(t)$ – поточна ємність із врахуванням старіння; σ – коефіцієнт саморозряду.

Загальна деградація акумулятора є результатом циклічного старіння (залежного від глибини розряду DoD) та календарного старіння (росту плівки SEI за законом Арреніуса). Обмеження робочої глибини розряду діапазоном 50–80 % DoD подовжує ресурс комірок із 2500–3000 до 6000–8000 циклів. Крім того, тривале утримання батареї на 100 % SoC (напруга > 3,45 В/комірку) прискорює деградацію електроліту. Науково обґрунтованою стратегією є програмне обмеження заряду до 85–90 % у черговому режимі та дозаряд до 100 % лише напередодні планових відключень [3].

Через дефіцит сонячної генерації взимку енергобаланс стабілізується адаптивним алгоритмом скидання навантаження (Load Shedding) відповідно до категорій надійності за ДБН В.2.5-23:2025: Категорія I (критичні: газовий котел, насоси опалення, системи зв'язку – 100 % резервування), Категорія II (важливі: освітлення, холодильники) та Категорія III (некритичні: бойлери, електроопалення, теплі підлоги). Алгоритм відключає Категорію III при SoC < 50 %, Категорію II – при SoC < 30 %, а при SoC ≤ 15 % активується захист BESS від глибокого перерозряду [4].

Надійність мікромережі оцінюється імовірністю дефіциту потужності (Loss of Power Supply Probability, LPSP):

$$LPSP = \sum_{t=1..T} max(0, P_{Load}(t) - P_{PV}(t) - P_{dis.max}(t)) / \sum_{t=1..T} P_{Load}(t). \quad (3)$$

Моделювання циклічних режимів 4/2 та 7/2 довело, що «вузьким місцем» є обмеження зарядного струму інвертора (C-rate ≤ 0,5C): за 2 години наявності мережі BESS не встигає повністю зарядитися, що викликає кумулятивний дефіцит. Впровадження алгоритму DSM гарантує LPSP = 0 для споживачів Категорії I протягом 24+ годин автономії, зменшує середню глибину розряду до 55–60 % та виключає необхідність економічно невиправданого завищення ємності BESS (зниження CAPEX на 40–50 %) [5].

Перелік джерел посилань

1. Alramlawi M., Li P. Design Optimization of a Residential PV-Battery Microgrid With a Detailed Battery Lifetime Estimation Model. IEEE Transactions on Industry Applications. 2020;56(2):2020–2030. DOI: 10.1109/TIA.2020.2965894.
2. Блінов І. В., Парус Є. В., Шиманюк П. В., Ворушило А. О. Модель оптимізації функціонування мікромережі з СЕС та установкою зберігання енергії. Технічна електродинаміка. 2024;5:69–78. DOI: 10.15407/techned2024.05.069.
3. Schimpe M., von Kuepach M. E., Naumann M. et al. Comprehensive Modeling of Temperature-Dependent Degradation Mechanisms in Lithium Iron Phosphate Batteries. Journal of The Electrochemical Society. 2018;165(2):A181–A193. DOI: 10.1149/2.1181714jes.
4. ДБН В.2.5-23:2025. Проєктування електроустановок житлових будинків та громадських будівель і споруд. Київ: Мінрегіон України, 2025. 132 с.
5. Khatib T., Ibrahim I. A., Mohamed A. A review on sizing methodologies of photovoltaic array and storage battery in a standalone photovoltaic system. Energy Conversion and Management. 2016;120:430–448. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.05.011.

УДК 621.311

РОЗПОДІЛЕНА ГЕНЕРАЦІЯ ТА НАКОПИЧУВАЧІ ЕНЕРГІЇ У ВІДНОВЛЕННІ ЕНЕРГОСИСТЕМИ УКРАЇНИ

Мейш Ю. А., д. техн. н., професор Самар Т.С., студент

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

Масовані удари по об’єктах енергетики показали, наскільки вразливою є енергосистема, побудована навколо великих електростанцій і магістральних мереж. За оцінкою Міжнародного енергетичного агентства (МЕА), після атак весни 2024 р. Україна мала лише близько 12 ГВт доступної керованої генерації проти приблизно 38 ГВт до повномасштабного вторгнення [1]. Тому відновлення доцільно розглядати не як відтворення попередньої структури, а як перехід до моделі, у якій значна частина потужностей розміщена поблизу споживачів.

Мета роботи – порівняти централізовану та розподілену моделі енергосистеми за критеріями енергетичної безпеки й визначити умови, за яких розподілена генерація посилює стійкість енергопостачання України.

До розподілених енергоресурсів належать сонячні й вітрові станції, когенераційні та газопоршневі установки, системи накопичення енергії. У базовому сценарії МЕА для досягнення національних цілей до 2030 р. передбачено близько 24 ГВт сонячної, 11 ГВт вітрової генерації та 6 ГВт систем накопичення понад наявні потужності [2]. Значну частину сонячних потужностей можуть становити установки на дахах житлових і промислових будівель: МЕА оцінює потребу в нарощуванні розподіленої сонячної генерації приблизно на 4 ГВт щороку [3].

Порівняння двох моделей за критеріями, важливими в умовах воєнних загроз, наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Порівняння централізованої та розподіленої моделей енергосистеми

Критерій	Централізована модель	Розподілена модель
Наслідки ураження одного об’єкта	знеструмлення великих територій	локальні, у межах зони живлення об’єкта
Строк введення нових потужностей	роки (будівництво великих станцій)	тижні – місяці (модульні установки)
Залежність від магістральних мереж	висока	низька; можлива робота в острівному режимі
Вимоги до розподільних мереж	потоки енергії в одному напрямку	двонапрямлені потоки, цифрове керування
Кіберзагрози	зосереджені на небагатьох об’єктах	велика кількість точок доступу
Керування режимами	централізоване диспетчерське	потребує прогнозування та агрегування малих джерел

Розподілена модель виграє за стійкістю до ударів і швидкістю відновлення, але висуває нові вимоги: модернізацію розподільних мереж, прогнозування виробітку та захист численних цифрових пристроїв. Тому децентралізація не скасовує великої енергетики, а доповнює її, формуючи багаторівневу систему. Змінність виробітку сонячних і вітрових станцій компенсують накопичувачі, а

узгоджену роботу великої кількості малих джерел забезпечують цифрові технології, передбачені Концепцією впровадження «розумних мереж» [4].

Державні документи задають рамку для такого переходу. Енергетична стратегія України до 2050 р. передбачає трансформацію галузі та інтеграцію з європейським енергетичним простором [5], а Національний план з енергетики та клімату до 2030 р. встановлює орієнтири розвитку відновлюваної енергетики та енергоефективності [6]. Практичними бар'єрами залишаються значні початкові інвестиції, складність приєднання великої кількості малих виробників і недостатня координація між державою, громадами, операторами мереж та бізнесом.

Отже, розподілена генерація разом із накопичувачами та цифровим керуванням є дієвим інструментом енергетичної безпеки України. Для реалізації її потенціалу доцільно: 1) пріоритетно розвивати сонячну генерацію на дахах разом із накопичувачами; 2) модернізувати розподільні мережі для двонапрямлених потоків енергії; 3) спростити приєднання малих виробників і механізми їх агрегування; 4) закладати вимоги кібербезпеки до цифрових пристроїв ще на етапі проєктування.

Перелік джерел посилань

1. Empowering Ukraine through a Decentralised Electricity System : a roadmap for Ukraine's increased use of distributed energy resources towards 2030. Paris : IEA, 2024. URL: https://www.iea.org/reports/empowering-ukraine-through-a-decentralised-electricity-system
2. Policy Options to Accelerate Distributed Solar PV in Ukraine. Paris : IEA, 2025. URL: https://www.iea.org/reports/policy-options-to-accelerate-distributed-solar-pv-in-ukraine
3. Ukraine's Energy Security : a pre-winter assessment. Paris : IEA, 2025. URL: https://www.iea.org/reports/ukraines-energy-security/a-pre-winter-assessment
4. Про схвалення Концепції впровадження «розумних мереж» в Україні до 2035 року : розпорядження Кабінету Міністрів України від 14.10.2022 № 908-р. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/908-2022-р
5. Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2050 року : розпорядження Кабінету Міністрів України від 21.04.2023 № 373-р. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/373-2023-р
6. Про схвалення Національного плану з енергетики та клімату на період до 2030 року : розпорядження Кабінету Міністрів України від 25.06.2024 № 587-р. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/587-2024-р

УДК 621.311.1:621.355

ВИБІР СКЛАДУ ОБЛАДНАННЯ АВТОНОМНОЇ ГІБРИДНОЇ СИСТЕМИ «ФЕС – АБ – ДГ» ЗА МІНІМУМОМ ПРИВЕДЕНИХ ВИТРАТ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ

Варивода Є. С., здобувач вищої освіти; Павленко В. М., к.т.н., доцент
Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

Для автономних об'єктів, що живляться від дизель-генератора (ДГ), додавання фотоелектричної станції (ФЕС) та акумуляторної батареї (АБ) зменшує витрати палива, проте збільшує капітальні витрати [1; 2]. Попередньо

на добовому графіку навантаження з максимумом 700 кВт показано, що гібридна система «ФЕС – АБ – ДГ» за правилами диспетчеризації економить до 81 % палива літньої доби. Річний результат залежить від сезонності генерації та співвідношення цін обладнання й палива.

Мета роботи – визначити склад обладнання, що мінімізує приведені витрати життєвого циклу (NPC), на річному інтервалі з урахуванням часткових режимів ДГ.

Витрату палива ДГ номінальної потужності $P_{\text{ном}}$ за навантаження P описано лінійною характеристикою

$$G = a\,P_{\text{ном}} + b\,P, \qquad (1)$$

де a = 0,0815 л/(кВт·год) і b = 0,246 л/(кВт·год) – коефіцієнти холостої та навантажувальної складових. Приведені витрати за T = 20 років

$$NPC = K + \sum_{t=1}^{T} \frac{C_{\text{п}} + C_{\text{е}}}{(1+r)^t} + \frac{K_{\text{з}}}{(1+r)^{10}}, \qquad (2)$$

де K – капітальні витрати; $C_{\text{п}}$, $C_{\text{е}}$ – річні витрати на паливо та експлуатацію; $K_{\text{з}}$ – заміна АБ на 10-му році (60 % початкової вартості); r = 8 %. Прийнято (ілюстративно): добовий графік навантаження 10,3 МВт·год незмінний протягом року; ДГ 800 кВт з мінімальним навантаженням 30 %; річна питома генерація ФЕС 1057 кВт·год/кВт з помісячним розподілом, близьким за порядком до даних PVGIS для Києва [3]; *SoC* АБ 20–90 %, потужність АБ – половина ємності, але не більше 1000 кВт; ціни 600 €/кВт (ФЕС), 250 €/(кВт·год) (АБ), 300 €/кВт (ДГ), паливо 1,3 €/л. Крок моделювання – 1 год, пріоритет: ФЕС → АБ → ДГ.

Таблиця 1 – Порівняння варіантів складу (розрахунок за припущеннями)

ФЕС, кВт / АБ, кВт·год	*NPC*, млн €	Паливо, м³/рік	Робота ДГ, год/рік	Надлишок ФЕС, МВт·год/рік
0 / 0 (лише ДГ)	19,99	1518	8760	–
2000 / 0	14,97	1026	6895	711
2000 / 4000	13,13	783	5425	24
3000 / 6000	10,68	488	3418	389
6000 / 6000	9,02	208	1404	2943

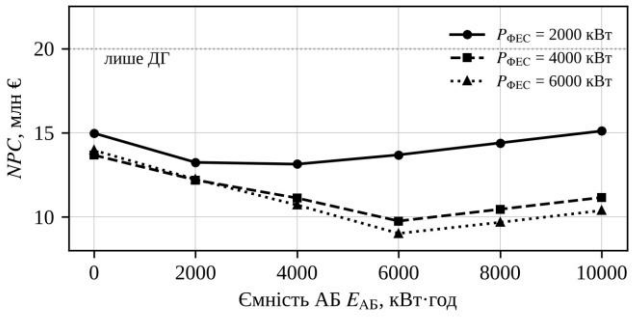


Рис. 1. Залежність NPC від ємності АБ за різної потужності ФЕС

За прийнятих цін мінімум NPC (9,02 млн €, у 2,2 раза менше, ніж для живлення лише від ДГ) досягається для ФЕС 6000 кВт і АБ 6000 кВт·год; приведена вартість енергії знижується з 0,54 до 0,25 €/(кВт·год), витрата палива – на 86 %. Мінімум пологий: варіанти з ФЕС 5000–7000 кВт і АБ 6000 кВт·год відрізняються за NPC не більше ніж на 2,5 %. Збільшення ємності АБ понад 6000 кВт·год не зменшує витрат, оскільки потужність розряду обмежена 1000 кВт, а

взимку бракує не потужності, а енергії ФЕС. Водночас оптимальний варіант має значний надлишок генерації ФЕС (2,9 ГВт·год/рік, близько 46 % її виробітку): його доцільно використовувати в регульованому навантаженні (нагрівання води, сушіння продукції), що потребує окремого аналізу [4; 5].

Висновок. На річному інтервалі вибір складу гібридної системи визначається співвідношенням цін ФЕС і палива: за прийнятих умов вигідна значна встановлена потужність ФЕС з АБ, що забезпечує нічне живлення. Результат чутливий до ціни палива, вартості обладнання та можливості використати надлишок енергії; надійність живлення буде оцінена в подальшій роботі.

Перелік джерел посилань

1. Aziz A. S., Tajuddin M. F. N., Adzman M. R., Ramli M. A. M., Mekhilef S. Energy Management and Optimization of a PV/Diesel/Battery Hybrid Energy System Using a Combined Dispatch Strategy. Sustainability. 2019. Vol. 11, No. 3. Art. 683. DOI: https://doi.org/10.3390/su11030683.
2. Ayop R., Isa N. M., Tan C. W. Components sizing of photovoltaic stand-alone system based on loss of power supply probability. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. Vol. 81, Part 2. P. 2731–2743. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.079.
3. Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) / European Commission, Joint Research Centre. URL: https://joint-research-centre.ec.europa.eu/photovoltaic-geographical-information-system-pvgis_en (дата звернення: 12.11.2026).
4. Shavolkin O., Shvedchykova I., Demishonkova S., Pavlenko V. Increasing the efficiency of hybrid photoelectric system equipped with a storage battery to meet the needs of local object with generation of electricity into grid. Przegląd Elektrotechniczny. 2021. Vol. 97, No. 11.
5. Каплун В. В., Нечаєва Т. П., Осипенко В. В., Каплун В. О., Павленко В. М. Оцінювання показників надійності децентралізованих джерел мікроенергосистем на основі статистичних даних. Енергетика і автоматика. 2026. № 4. С. 18–30. DOI: https://doi.org/10.31548/energiya4(86).2026.018.

УДК 621.311.1:004.94

ВИБІР КОЕФІЦІЄНТА SOC-АДАПТАЦІЇ DROOP-КЕРУВАННЯ НАКОПИЧУВАЧІВ РІЗНОЇ ЄМНОСТІ В ОСТРІВНІЙ МІКРОМЕРЕЖІ

Васільєв М. М., здобувач вищої освіти; Павленко В. М., к.т.н., доцент
Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

В острівному режимі мікромережі кілька акумуляторних накопичувачів (BESS) з мережевими інверторами розподіляють навантаження за статичними характеристиками (droop) без швидкого каналу зв’язку [1]. Класичний droop не враховує ступінь заряду (*SoC*), тому накопичувач з меншим запасом розряджається першим і вимикається. SoC-адаптивний droop змінює нахил характеристики залежно від *SoC* [2]. Попередньо показано, що зі збільшенням показника адаптації *k* від 0 до 3 використання запасу енергії зростає приблизно з 59 до 98 %. Однак адаптація перевантажує накопичувач з більшим *SoC*.

Мета роботи – обґрунтувати вибір показника адаптації *k* з урахуванням обмеження потужності інверторів.

Характеристика *i*-го накопичувача з адаптивним нахилом:

$$f = f_0 - m_i P_i, \qquad m_i = m_0 \left(\frac{SoC_{\text{сер}}}{SoC_i}\right)^k, \tag{1}$$

де $SoC_{\text{сер}}$ – середній ступінь заряду. В усталеному режимі частота однакова для всіх інверторів, тому навантаження $P_{\text{н}}$ розподіляється як

$$P_i = P_{\text{н}} \frac{SoC_i^k}{\sum_j SoC_j^k}. \tag{2}$$

Для двох накопичувачів із (2) випливає найбільше значення k, за якого потужність першого не перевищує номінальну $P_{\text{ном}}$:

$$k_{\max} = \frac{\ln[P_{\text{ном}}/(P_{\text{н}} - P_{\text{ном}})]}{\ln(SoC_1/SoC_2)}. \tag{3}$$

Прийнято (ілюстративно): два BESS по 500 кВт·год, $P_{\text{ном}}$ = 250 кВт, початкові *SoC* 80 і 45 %, нижня межа 20 %, навантаження 300 кВт; за перевищення $P_{\text{ном}}$ інвертор обмежує потужність, а надлишок бере інший накопичувач.

Згідно з (3), для $P_{\text{н}}$ = 300 кВт і співвідношення *SoC* 80/45 % $k_{\max}$ = 2,8: за k = 3 перший накопичувач без обмеження мав би віддати 255 кВт (102 % $P_{\text{ном}}$), табл. 1.

Таблиця 1 – Вплив показника адаптації (розрахунок за припущеннями, $P_{\text{н}}$ = 300 кВт)

Показник k	0	1	2	3	4	6
Використання запасу, %	58,8	81,7	94,3	98,3	99,4	99,9
Тривалість живлення, год	0,83	1,16	1,34	1,39	1,41	1,41
$P_{1,\max}$ без обмеження, кВт	150	192	228	255	273	291

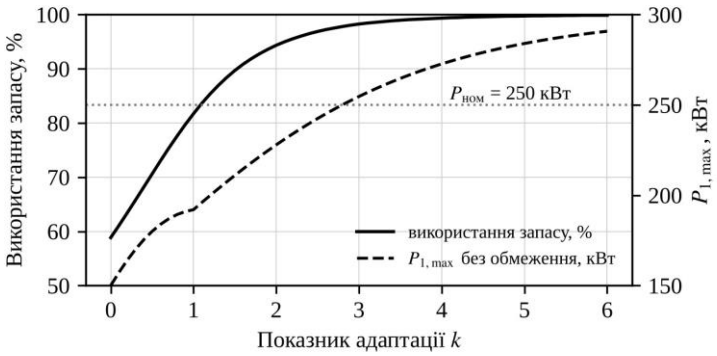


Рис. 1. Використання запасу енергії та найбільша потужність першого накопичувача

Обмеження потужності інвертора усуває перевантаження і майже не зменшує використання запасу (98,3 %), проте розподіл тоді визначає вже струмове обмеження, а не droop. За навантаження 200 кВт обмеження не спрацьовує за жодного $k \le 6$, отже вибір k визначається найважчим режимом. Вирівнювання *SoC* (різниця менше 2 %) до розряду до нижньої межі досягається лише за $k \ge 3$: через 1,32 год за k = 3 і через 0,99 год за k = 6; за $k \le 2$ накопичувачі доходять до межі з різними *SoC*. Приріст використання запасу за $k > 3$ не перевищує 1,6 %, а перевантаження зростає, тому раціональним є діапазон k = 2–3 з обмеженням потужності інверторів. Оскільки $k_{\max}$ обернено пропорційний $\ln(SoC_1/SoC_2)$, за меншої нерівномірності (80/60 %) $k_{\max}$ = 5,6; отже, показник можна змінювати в реальному часі залежно від поточних *SoC* і навантаження.

Висновок. Показник SoC-адаптації droop-керування доцільно вибирати за формулою (3) для найбільшого навантаження та найбільшої очікуваної нерівномірності *SoC*; для розглянутого прикладу це $k \approx 2{,}8$. Подальша робота – дослідження впливу k на стійкість у малому (з урахуванням фільтра вимірювання потужності) в моделі Simulink та поєднання з логікою автоматичного відновлення живлення [3–5].

Перелік джерел посилань

1. Rocabert J., Luna A., Blaabjerg F., Rodríguez P. Control of Power Converters in AC Microgrids. IEEE Transactions on Power Electronics. 2012. Vol. 27, No. 11. P. 4734–4749. DOI: https://doi.org/10.1109/TPEL.2012.2199334.
2. Tian G., Zheng Y., Liu G., Zhang J. SOC Balancing and Coordinated Control Based on Adaptive Droop Coefficient Algorithm for Energy Storage Units in DC Microgrid. Energies. 2022. Vol. 15, No. 8. Art. 2943. DOI: https://doi.org/10.3390/en15082943.
3. IEEE Std 2030.7-2017. IEEE Standard for the Specification of Microgrid Controllers. New York: IEEE, 2018.
4. Павленко В., Нікітін Є. Інтеграція мікроТЕС Стірлінга в керовані PV–BESS мікромережі. Електромеханічні і енергозберігаючі системи. 2026. № 2 (73). С. 8–15. DOI: https://doi.org/10.32782/2072-2052.2026.2.73.1.
5. Каплун В. В., Нечаєва Т. П., Осипенко В. В., Каплун В. О., Павленко В. М. Оцінювання показників надійності децентралізованих джерел мікроенергосистем на основі статистичних даних. Енергетика і автоматика. 2026. № 4. С. 18–30. DOI: https://doi.org/10.31548/energiya4(86).2026.018.

УДК 621.311.243:621.3.018.3

ДОПУСТИМА ПОТУЖНІСТЬ ПРИЄДНАННЯ ФОТОІНВЕРТОРІВ ДО МЕРЕЖІ 0,4 КВ ЗА ПОКАЗНИКАМИ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ТА СПОСОБИ ЗНИЖЕННЯ ГАРМОНІК

Крегул Б. Ю., здобувач вищої освіти; Павленко В. М., к.т.н., доцент

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

Зростання кількості фотоелектричних станцій (ФЕС), приєднаних до мереж 0,4 кВ, ставить перед операторами систем розподілу питання: яку потужність можна приєднати в конкретній точці без порушення показників якості електроенергії (hosting capacity). Обмеження зазвичай визначають підвищення напруги та гармонійні спотворення, причому вплив інверторів на гармоніки суттєво залежить від потужності короткого замикання мережі та фонових спотворень [1–3]. Попередньо для мережі 10/0,4 кВ отримано, що коефіцієнт гармонійних складових напруги THD_U змінюється в межах 0,33–6,63 % за зменшення $S_к$ від 20 до 1 МВ·А.

Мета роботи – визначити допустиму потужність ФЕС у точці приєднання 0,4 кВ за двома критеріями (підвищення напруги та гармоніки) і порівняти ефект заходів з їх пом’якшення.

Підвищення напруги у точці приєднання за потужності ФЕС P оцінювали як

$$\Delta U\,\% = 100\,\frac{P}{S_к}(\cos\psi_к - \sin\psi_к \mathrm{tg}\varphi), \qquad (1)$$

де $S_к$ – потужність короткого замикання; $\psi_к$ – кут опору мережі (прийнято $R/X = 1$); tg φ – коефіцієнт реактивної потужності інвертора (споживання $Q > 0$). Напругу h-ї гармоніки визначали з урахуванням фонового спотворення $U_{h,ф}$:

$$U_h = U_{h,ф} + i_h \frac{P}{S_к}\sqrt{\cos^2\psi_к + h^2\sin^2\psi_к}, \qquad (2)$$

де i_h – гармоніка струму інвертора у частках номінального. Прийнято (ілюстративно): $\Delta U \le 3$ %; $U_h \le 5$ % і $THD_U \le 8$ % [1]; спектр А – i_5, i_7, i_{11}, i_{13} = 4; 3; 1,5; 1 %, спектр Б (інвертор з компенсацією гармонік) – удвічі менший; фон U_5, U_7, U_{11}, U_{13} = 2; 1,5; 0,7; 0,5 % ($THD_{U,ф}$ = 2,6 %), складання арифметичне (найгірший випадок).

Таблиця 1 – Допустима потужність ФЕС, кВт (розрахунок за припущеннями)

$S_к$, МВ·А	ΔU, cos φ = 1	ΔU, cos φ = 0,9	Гармоніки, спектр А	Гармоніки, спектр Б
1	42	82	208	416
2	85	164	416	832
5	212	411	1040	2080
10	424	822	2080	4160

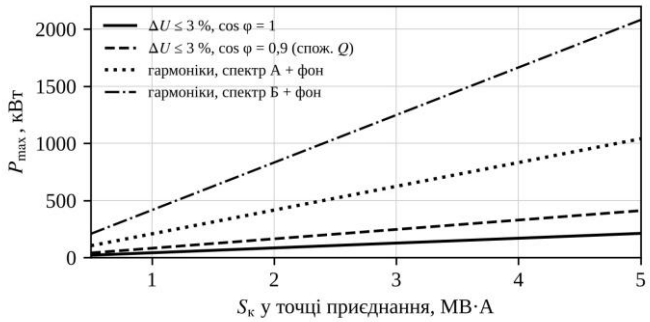


Рис. 1. Допустима потужність ФЕС за різними критеріями

За прийнятих умов визначальним є підвищення напруги: допустима потужність становить ≈ 4,2 % $S_к$, тоді як гармонійний критерій дозволяє ≈ 20,8 % $S_к$ (обмежує 5-та гармоніка). Режим споживання реактивної потужності з cos φ = 0,9 (наприклад, характеристика Volt-VAR [2]) майже подвоює допустиму потужність, а інвертор з меншим спектром струму подвоює запас за гармоніками. Без фонового спотворення гармонійна межа зростає до 31 % $S_к$, тобто фон «з'їдає» третину запасу. Модель не враховує резонанси між ємностями інверторів і кабелів та індуктивністю мережі, за яких окремі гармоніки можуть зростати в рази; саме тому LCL-фільтр інвертора не замінює перевірки резонансних частот у точці приєднання. Допустиму потужність можна збільшити регулюванням реактивної потужності інверторів, обмеженням активної потужності в години максимуму генерації, активною фільтрацією гармонік або посиленням мережі.

Висновок. Для мережі 0,4 кВ з $R/X \approx 1$ допустима потужність ФЕС за прийнятих припущень обмежується підвищенням напруги, а гармоніки стають визначальними за значного фону та резонансів. Подальша робота передбачає

перевірку моделі вимірюваннями якості електроенергії на реальних фідерах із використанням засобів моніторингу [4; 5].

Перелік джерел посилань

1. IEEE Std 519-2014. IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. New York: IEEE, 2014.

2. IEEE Std 1547-2018. IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces. New York: IEEE, 2018. DOI: https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2018.8332112.

3. Elphick S., Robinson D. A., Knott J. C., Drury G. Data-Driven Assessment of the Impact of Solar Photovoltaic Generation on Distribution Network Harmonic Distortion. Solar. 2025. Vol. 5, No. 4. Art. 57. DOI: https://doi.org/10.3390/solar5040057.

4. Павленко В. М., Петренко А. В., Мартинюк Л. В., Бунтов М. І., Афінович С. Г. Семантична модель доступу до даних моніторингу якості електричної енергії в автоматизованих інформаційно-вимірювальних системах. Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. 2026. № 2 (28). С. 74–79. DOI: https://doi.org/10.20998/2413-4295.2026.02.10.

5. Зеленський Д. В., Павленко В. М. Автоматизована система контролю якості електропостачання на базі Arduino з виявленням аномалій та віддаленим моніторингом. Енергоефективний університет: матеріали XIV Міжнар. наук.-практ. конф., Київ, 23 жовт. 2025 р. Київ: КНУТД, 2025.

УДК 620.9:621.41

СТІЙКІСТЬ ВИБОРУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПОТУЖНОСТІ ПЕЛЕТНОЇ МІКРОТЕЦ ІЗ ДВИГУНОМ СТІРЛІНГА ДО ПРІОРИТЕТІВ КРИТЕРІЇВ ОЦІНЮВАННЯ

Нікітін Є. С, аспірант; Павленко В. М., к.т.н., доцент

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

МікроТЕЦ із двигуном Стірлінга завдяки зовнішньому згорянню можуть працювати на місцевому біопаливі, зокрема на деревних пелетах, і одночасно забезпечувати теплом та електроенергією ферми й приватні будинки [1; 2]. Вибір потужності за максимальним тепловим навантаженням призводить до частих пусків і зупинок двигуна, що скорочує його ресурс і знижує паливну ефективність [3]. У розвиток досліджень мікроТЕС Стірлінга [4] авторами запропоновано обмежувати номінальну електричну потужність базовим навантаженням об’єкта, а теплову — поточним споживанням і ємністю гідравлічного буфера; за методом точки утопії з рівними вагами критеріїв найкращою виявилася установка потужністю 3 кВт. Проте ваги критеріїв суб’єктивні, а вихідні дані невизначені.

Мета роботи – оцінити стійкість вибору конфігурації мікроТЕЦ 1–10 кВт до ваг критеріїв і похибок даних. Розглянуто чотири сценарії (табл. 1) і три критерії: економію первинної енергії *PES* (max), частку власного споживання електроенергії $E_{вл}$ (max) і простий строк окупності *SPB* (min). Після нормування на відрізок [0; 1] (для *SPB* – оберненого) відстань *i*-го сценарію до точки утопії (1; 1; 1)

$$D_i = \sqrt{\sum_{j=1}^{3} w_j \left(1 - k_{ij}\right)^2}, \qquad \sum_j w_j = 1, \tag{1}$$

де k_{ij} — нормоване значення j-го критерію; w_j — вага. Об’єм буфера, що акумулює теплоту протягом $\tau = 1$ год за перепаду температур $\Delta t = 20$ К,

$$V = \frac{Q_т \tau}{\rho c \, \Delta t}. \tag{2}$$

Таблиця 1 – Матриця рішень (розрахунок авторів) і відстань до точки утопії за рівних ваг

Сцен.	$P_е$ / $Q_т$, кВт	V, м^3	*PES*, %	$E_{вл}$, %	*SPB*, роки	D_i
S1	1 / 5,4	0,23	10,5	98	8,5	0,765
S2	3 / 19,5	0,84	14,7	85	5,2	0,409
S3	5 / 25,0	1,07	20,6	60	6,4	0,414
S4	10 / 40,0	1,72	23,5	35	9,0	0,816

Для оцінювання стійкості виконано два обчислювальні експерименти: перебір усіх наборів ваг на симплексі $w_1 + w_2 + w_3 = 1$ з кроком 0,005 (20 301 набір) і 5000 реалізацій методу Монте-Карло, у яких кожен елемент матриці рішень змінювався випадково в межах ±10 % за рівних ваг.

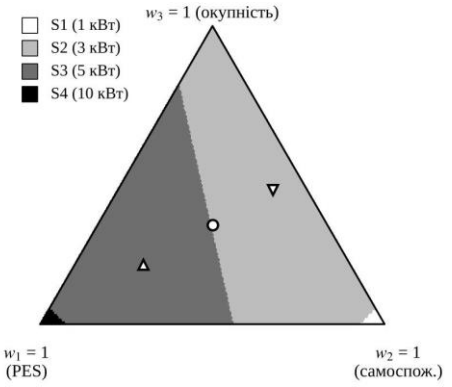


Рис. 1. Області оптимальності сценаріїв на симплексі ваг (○ – рівні ваги; △ – пріоритет PES; ▽ – пріоритет самоспоживання й окупності)

Сценарій S2 (3 кВт) оптимальний для 54,6 % наборів ваг, S3 (5 кВт) – для 44,6 %, а S1 і S4 – лише для 0,4 % кожен, поблизу вершин симплексу. Межа між S2 і S3 за $w_2 = w_3$ проходить через $w_1 = 0{,}341$, поряд із точкою рівних ваг (0,333); відстані D_i для S2 і S3 різняться лише на 1,3 %. За похибки вихідних даних ±10 % S2 виграє в 54,5 % реалізацій, S3 — у 45,5 %, а S1 і S4 — у жодній. Отже, стійким є висновок про діапазон 3–5 кВт, а вибір у ньому визначається пріоритетом: за вагомості *PES* понад ≈ 0,34 доцільна установка 5 кВт з буфером 1,07 м³, інакше – 3 кВт з буфером 0,84 м³.

Висновок. Правило обмеження електричної потужності базовим навантаженням стійке до зміни пріоритетів і похибок даних: крайні конфігурації 1 і 10 кВт оптимальні лише за вироджених ваг. Однозначний вибір між 3 і 5 кВт

потребує даних конкретного об’єкта; подальша робота – уточнення матриці рішень за реальними графіками навантаження, динамічна модель пальника й буфера, інтелектуальне керування в децентралізованій енергосистемі [5].

Перелік джерел посилань

1. Zhu S., Yu G., Liang K., Dai W., Luo E. A review of Stirling-engine-based combined heat and power technology. Applied Energy. 2021. Vol. 294. Art. 116965. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116965.
2. Cardozo E., Erlich C., Malmquist A., Alejo L. Integration of a wood pellet burner and a Stirling engine to produce residential heat and power. Applied Thermal Engineering. 2014. Vol. 73, No. 1. P. 671–680. DOI: https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.08.024.
3. Lipp J. Field test with Stirling engine micro-combined heat and power units in residential buildings. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy. 2013. Vol. 227, No. 1. P. 43–52. DOI: https://doi.org/10.1177/0957650912458755.
4. Павленко В., Нікітін Є. Інтеграція мікроТЕС Стірлінга в керовані PV–BESS мікромережі. Електромеханічні і енергозберігаючі системи. 2026. № 2 (73). С. 8–15. DOI: https://doi.org/10.32782/2072-2052.2026.2.73.1.
5. Pavlenko V., Ponomarenko I., Morhulets O., Ponomarenko D., Danylchenko D. Synergy of Blockchain and Artificial Intelligence for Decentralized Smart Energy Management. Smart Innovations in Energy and Mechanical Systems (SIEMS 2025). Cham: Springer, 2025. P. 184–194. (Lecture Notes in Networks and Systems). DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-95191-6_18.

УДК 621.311.6:621.436

ОБҐРУНТУВАННЯ РЕЖИМУ РОБОТИ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРА В КОМБІНОВАНІЙ СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ ЛОКАЛЬНОГО ОБ’ЄКТА З НАКОПИЧУВАЧЕМ ЕНЕРГІЇ

Степанюк О., здобувач вищої освіти; Макаревич С. С., к.т.н., доцент
Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

Під час тривалих перерв централізованого електропостачання резервний дизель-генератор (ДГ) локального об’єкта, потужність якого обрано за максимальним навантаженням, у нічні години та вихідні дні працює із завантаженням, у кілька разів меншим за номінальне, що спричиняє підвищену питому витрату палива та прискорений знос двигуна. Система накопичення енергії (СНЕ) дає змогу перейти до циклічного режиму, за якого ДГ працює з підвищеним завантаженням, одночасно живлячи навантаження й заряджаючи СНЕ, а потім вимикається.

Засади структурно-параметричного синтезу комбінованих систем електроживлення та управління їх енергоефективністю викладено в [1, 2], лінійну модель паливної характеристики ДГ наведено в [3], структурування енергетичного балансу об’єктів з локальними енергоактивами – в [4]. Мета роботи – кількісно обґрунтувати уставку потужності ДГ у циклічному режимі спільної роботи з СНЕ за критеріями витрати палива, мотогодин і допустимої глибини розряду накопичувача.

Розрахунок виконано для навчального прикладу з умовними вихідними даними (результати є попередньою інженерною оцінкою, а не даними

вимірювань): тривалість перерви T = 8,0 год; навантаження $P_н$ = 15,0 кВт; номінальна потужність ДГ $P_{ном}$ = 50,0 кВт; номінальна ємність СНЕ $E_{ном}$ = 130 кВт·год; DoD = 0,90; ККД заряду $\eta_{зар}$ = 0,95 та інвертора $\eta_{інв}$ = 0,95; температурний коефіцієнт k_t = 0,90; коефіцієнт старіння АКБ $k_{ст}$ = 0,80. Паливну характеристику ДГ прийнято лінійною за прикладом генератора 50 кВт з [3] (8,48 л/год за 25 кВт і 15,3 л/год за 50 кВт); годинну витрату палива визначали за формулою:

$$F = F_0 \cdot P_{ном} + F_1 \cdot P_{дг}, \quad (1)$$

де F_0 = 0,0331 л/(год·кВт) – коефіцієнт витрати холостого ходу; F_1 = 0,273 л/(кВт·год) – нахил характеристики; $P_{дг}$ – потужність ДГ. За умови повернення рівня заряду СНЕ на кінець перерви до початкового тривалість роботи ДГ з уставкою $P_{дг} > P_н$ визначали з енергетичного балансу накопичувача:

$$t_{дг} = \frac{P_н \cdot T}{P_н + (P_{дг} - P_н) \cdot \eta_{зар} \cdot \eta_{інв}}, \quad (2)$$

а витрату палива за перерву V і розмах енергії СНЕ ΔE з перевіркою за допустимою енергією – за формулами:

$$V = F \cdot t_{дг},\ \Delta E = (P_{дг} - P_н) \cdot \eta_{зар} \cdot t_{дг} \le E_{ном} \cdot DoD \cdot k_t \cdot k_{ст}. \quad (3)$$

Для базового режиму (ДГ безперервно живить навантаження, завантаження 30 %) за формулою (1) F = 5,75 л/год, V = 46,0 л, питома витрата – 0,383 л/(кВт·год). Допустима енергія СНЕ за формулою (3) становить 130·0,9·0,9·0,8 = 84,2 кВт·год. Результати для циклічного режиму наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Показники циклічного режиму роботи ДГ із СНЕ

$P_{дг}$, кВт	**Завантаження, %**	**$t_{дг}$, год**	**F, л/год**	**V, л**	**Питома витрата, л/(кВт·год)**	**ΔE, кВт·год**	**Зміна V, %**
15 (базовий)	30	8,00	5,75	46,0	0,383	0	–
30	60	4,21	9,85	41,4	0,345	59,9	−10,0
40	80	3,20	12,58	40,2	0,335	75,9	−12,7
50	100	2,58	15,31	39,4	0,329	85,6*	−14,3

* – перевищує допустиму енергію СНЕ 84,2 кВт·год.

Циклічний режим зменшує витрату палива за перерву на 10,0–14,3 %, а тривалість роботи ДГ – з 8,0 до 2,6–4,2 год. Економію палива обмежують втрати енергії в СНЕ ($\eta_{зар} \cdot \eta_{інв}$ = 0,90), тому основний ефект – скорочення мотогодин і усунення роботи ДГ з малим завантаженням. Уставка 100 % дає найменшу витрату палива, але потребує ΔE = 85,6 кВт·год, що перевищує допустиму енергію СНЕ, і не залишає запасу потужності ДГ на пускові струми. За умовних 30 перерв на рік уставка 80 % зменшує річну витрату палива на 175 л, а напрацювання ДГ – з 240 до 96 мотогодин.

З умови (3) гранична уставка ДГ становить $P_{дг,max}$ = 48,3 кВт (96,6 % $P_{ном}$), а мінімальна ємність СНЕ для уставки 40 кВт – 117 кВт·год.

Отже, для розглянутого об’єкта раціональною є уставка ДГ 40 кВт (80 % номінальної потужності) у циклічному режимі із СНЕ: витрата палива зменшується на 12,7 %, мотогодини – на 60 %, розмах енергії СНЕ 75,9 кВт·год

не перевищує допустимого значення, зберігається запас потужності ДГ. Для остаточного обґрунтування необхідно використати паливну характеристику конкретної моделі ДГ за даними виробника та оцінити додатковий циклічний знос АКБ у межах кваліфікаційної роботи.

Перелік джерел посилань

1. Каплун В. В., Штепа В. М., Кравченко О. П., Шавьолкін О. О., Каплун Р. В., Дончик Є. М., Макаревич С. С. Структурно-параметричний синтез комбінованих систем електроживлення : монографія. Київ, 2017. ISBN 978-617-7506-02-6.
2. Каплун В. В., Осипенко В. В., Штепа В. М., Макаревич С. С. Управління енергоефективністю локальних систем електроживлення : монографія. Київ, 2020. ISBN 978-617-7986-02-6.
3. Generator Fuel Curve Slope. HOMER Pro 3.16 User Manual. UL Solutions. URL: https://support.ul-renewables.com/homer-manuals-pro/generator_fuel_curve_slope.html (дата звернення: 29.10.2026).
4. Kaplun V., Trokhaniak V., Makarevych S., Radko I., Lytvyn V. Structuring the energy balance of territorial communities with local infrastructure assets. Machinery and Energetics. 2024. Vol. 15, No. 4. P. 22–33.

УДК 636.083

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРИБИРАННЯ ТВАРИННИЦЬКИХ ПРИМІЩЕНЬ

Соловей І. М., к.т.н., доцент

Відокремлений підрозділ національного університету біоресурсів і природокористування України «Бережанський агротехнічний інститут», м. Бережани, Україна.

Організація прибирання тваринницьких приміщень, зокрема видалення гною та заміни підстилки, залежить від системи утримання тварин, рівня механізації виробничих процесів і технології подальшого використання гною. За трудомісткістю ці операції становлять близько 15–30 % загальних затрат праці [1, 2]. Зі збільшенням концентрації поголів’я на великих фермах і тваринницьких комплексах зростають обсяги накопичення гною, що зумовлює необхідність його своєчасного видалення для забезпечення належних санітарно-гігієнічних умов утримання тварин та ефективної організації виробничого процесу.

При різних системах утримання тварин роботи з видалення гною можуть виконуватися вручну, механізовано або комбінованим способом. При прив’язному утриманні тварин затрати праці на ці операції становлять 65–75 % загальних затрат на прибирання приміщень, а при безприв’язному – 37–53 % [1]. Тому одним із напрямів підвищення ефективності виробничих процесів є подальша механізація видалення гною.

Найбільш поширеним технічним засобом є скребкові транспортери кругового руху [3]. Для видалення гною, який потрапляє через щілини підлоги до гнойових каналів, застосовують штангові транспортери зі зворотно-поступальним рухом робочих органів.

Горизонтальний штанговий транспортер із вертикальною віссю кріплення скребків складається зі штанги зі скребками, з’єднувального ланцюга, поворотного пристрою та приводної станції. Штанга призначена для

переміщення гною вздовж поздовжньої ділянки гнойового каналу. На металевому прутку штанги вертикально закріплені осі, на яких встановлені скребки. Під час робочого ходу штанга переміщується вперед, а скребки захоплюють і переміщують гній у напрямку руху. При зворотному ході скребки складаються та повертаються у вихідне положення, не переміщуючи гній у зворотному напрямку.

Для підвищення надійності та спрощення конструкції привода штангового транспортера доцільним є використання лінійного асинхронного двигуна (ЛАД). Застосування такого приводу дає змогу безпосередньо отримувати зворотно-поступальний рух робочого органу, зменшити кількість механічних деталей і поверхонь тертя, а також потенційно скоротити експлуатаційні витрати.

Лінійні асинхронні двигуни находять застосування для створення зворотно-поступального руху, однак їх використання в таких механізмах супроводжується певними енергетичними обмеженнями. Зокрема, коефіцієнт корисної дії ЛАД може бути нижчим порівняно з традиційними електроприводами через особливості розподілу магнітного поля в повітряному зазорі. Додаткові енергетичні втрати виникають під час пусків, зупинок і реверсування, що негативно впливає на ККД та коефіцієнт потужності.

Одним із напрямів підвищення ефективності такого привода є регулювання параметрів його роботи. Зміна частоти та амплітуди зворотно-поступального руху робочого органу дає змогу регулювати продуктивність транспортера залежно від кількості та консистенції гною, а також забезпечувати оптимальний режим роботи електропривода.

Таким чином, використання лінійного асинхронного двигуна як привода штангового транспортера є перспективним напрямом удосконалення систем механізації прибирання тваринницьких приміщень. Подальші дослідження доцільно спрямувати на визначення оптимальних режимів роботи ЛАД, оцінювання його енергетичних показників та встановлення залежності продуктивності транспортера від параметрів зворотно-поступального руху.

Перелік джерел посилань

1. Мельник В. М. Технології та технічні засоби видалення гною на фермах. Київ : Аграрна наука, 2013. 295 с.
2. Consegic Business Intelligence. Manure Handling Equipment Market Size, Share & Analysis. 2025. URL: https://www.consegicbusinessintelligence.com/manure-handling-equipment-marke.
3. Науменко О. А. Машини і обладнання для тваринницьких ферм. Полтава : Дивосвіт, 2014. 367 с.

УДК 621.31: 65.011.1

РОЗПОДІЛ ВІДПОВІДАЛЬНОСТІ ЗА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ

Станішевський Г. Г, Трунова І. М., к.т.н., доцент
[1]ДТЕК «Одеські електромережі», м. Одеса, Україна.
[2]Державний біотехнологічний університет, м. Харків, Україна.

В багатьох європейських країнах граничні рівні завад використовують у координації електромагнітної сумісності (ЕМС). Координація спрямована на те, щоб розподілити між окремими електроустановками дозволені завади, що випромінюються. Це намагаються зробити таким чином, щоб перевищення граничних рівнів завад сукупним значенням завад, що випромінюються, могло відбуватися з дуже малою ймовірністю. З метою забезпечення ЕМС у стандартах серії IEC 61000 [1-3] наведено граничні рівні ЕМС для різних видів електроустановок, які функціонують в мережах низької (НН) та середньої (СН) напруги. Серед цих документів [1,2] набули чинності в Україні. Зрозуміло, що окрема електроустановка вносить лише частку глобального внеску завад, тому слід особливу увагу приділяти найбільш потужним установкам. Таким чином, першим аспектом, що можна враховувати згідно з рекомендаціями [4] для розподілу відповідальності за забезпечення ЕМС, є адаптована специфікація вимог до викидів електроустановок з врахуванням відповідних стандартів щодо ЕМС та їх дотримання (див. рисунок 1).

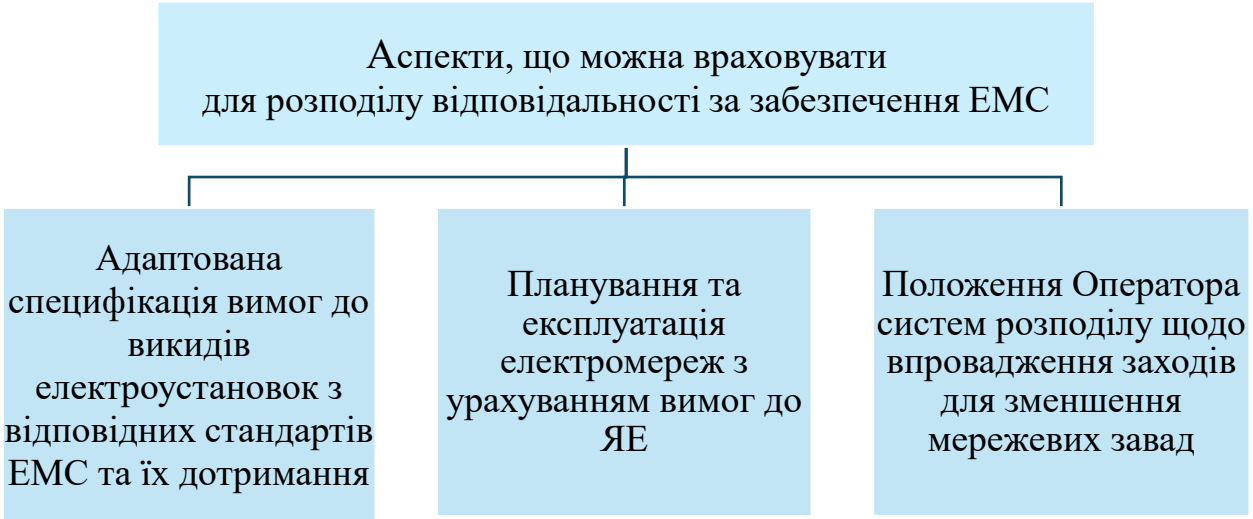


Рис. 1. Аспекти, що можна враховувати для розподілу відповідальності за забезпечення ЕМС згідно з рекомендаціями [4]

Другий аспект - це планування та експлуатація електромереж з урахуванням вимог до якості електричної енергії (ЯЕ). В Україні проектні розрахунки відбуваються з обов'язковою перевіркою при запланованому навантаженні мережі рівня відхилень напруги у споживачів. При цьому, при приєднанні нових електроустановок приймається, що усі вони відповідають Технічному регламенту з ЕМС, так як в ньому зазначається, що «обладнання може бути надано на ринку та/або введено в експлуатацію тільки в разі, коли воно відповідає вимогам цього Технічного регламенту за умови належного встановлення, обслуговування та використання за призначенням» [5]. Однак, за необхідності все ж доцільно вказувати в Технічних умовах на приєднання ту частку глобального внеску у завади мережі у точці підключення, хоча б для найбільш потужних електроустановок споживача (зокрема, і зі струмом 75 А та більше). Експлуатація електроустановок в Україні підпорядкована вимогам нормативних документів, що дозволяє підтримувати ЯЕ відповідно до чинних стандартів, однак, слід враховувати, що під час експлуатації технічний стан

електроустановок змінюється і відповідність електроустановок Технічному регламенту [5] може бути не очевидною. При цьому за Кодексом систем розподілу (КСР) [6] Оператор систем розподілу (ОСР) має виконувати моніторинг ЯЕ, в тому числі, в точках приєднання споживачів до системи розподілу, якщо є, наприклад, скарги щодо ЯЕ від споживачів. Отже, для розподілу відповідальності за забезпечення ЕМС, за рекомендаціями [1] третій аспект - має бути положення ОСР щодо впровадження заходів для зменшення мережевих завад, що враховує вимоги КСР, де зазначається процедура впливу на споживачів електроустановок, які погіршують ЯЕ, періодичність моніторингу ЯЕ тощо.

Таким чином, для забезпечення ЕМС має бути реалізований механізм розподілу відповідальності, в основі якого є адаптована специфікація вимог до викидів електроустановок з врахуванням стандартів ЕМС, що має бути зазначена у Технічних умовах на приєднання для найбільш потужних електроустановок споживача, зокрема, зі струмом від 75 А з зазначенням частки глобального внеску у завади мережі у точці підключення.

Перелік джерел посилань

1. Електромагнітна сумісність (ЕМС). Частина 3-2. Норми. Норми емісії гармонійних складників струму (обладнання із силою вхідного струму не більше ніж 16 А в одній фазі): ДСТУ EN IEC 61000-3-2:2019 (EN IEC 61000-3-2:2019, IDT; IEC 61000-3-2:2018, IDT). [Чинний з 1.09.2019] - К.: Держстандарт України, 2019.
2. Електромагнітна сумісність. Частина 3-12. Гранично допустимі рівні. Гранично допустимі рівні сили струму гармонік, створених обладнанням з номінальним вхідним струмом силою понад 16 А та до 75 А включно на фазу, підключеним до низьковольтних електропостачальних систем загальної призначеності: ДСТУ EN 61000-3-12:2017 (EN 61000-3-12:2011, IDT; IEC 61000-3-12:2011, IDT). [Чинний з 1.01.2019] - К.: Держстандарт України, 2019.
3. Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-14: Assessment of emission limits for harmonics, interharmonics, voltage fluctuations and unbalance for the connection of disturbing installations to LV power systems: . IEC TR 61000-3-14:2011.[Valid from 2011-10-20].
4. D-A-CH-CZ rules for the assessment of network disturbances. Part A: Fundamentals. 3rd edition. – D-A-CH-CZ, 2021. – p. 104.
5. Технічний регламент з електромагнітної сумісності обладнання. [Електронний ресурс]. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1077-2015-п#Text (дата звернення 15.10.2026).
6. Кодекс систем розподілу. [Електронний ресурс]. URL: http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0310874-18#n11 (дата звернення: 15.10.2026).

УДК 621.316.1

ОСНОВНІ ЧИННИКИ ВИНИКНЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ВТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ ТА ШЛЯХИ ЇХ МІНІМІЗАЦІЇ

Кравчук О.А.[1], здобувач вищої освіти 2-го курсу ОС «Магістр» спеціальності G3 «Електрична інженерія»

[1]Поліський національний університет, м. Житомир, Україна

Забезпечення ефективного функціонування розподільних електричних мереж є одним із важливих завдань сучасної електроенергетики України. Особливої актуальності набуває проблема технологічних втрат електроенергії,

які зумовлюють додаткові витрати енергетичних ресурсів та знижують ефективність діяльності операторів систем розподілу. Для АТ «Житомирobленерго» мінімізація таких втрат є важливим напрямом підвищення ефективності експлуатації та модернізації електричних мереж.

Технологічні втрати електроенергії виникають у процесі її передавання та розподілу і залежать від технічного стану обладнання, величини навантаження, конфігурації мережі та режимів її роботи. Основними складовими є втрати в лініях електропередачі, силових трансформаторах та інших елементах системи електропостачання. Відповідно до фізичної природи їх поділяють на навантажувальні та умовно-постійні. Навантажувальні втрати залежать від величини струму, тоді як умовно-постійні визначаються переважно характеристиками електрообладнання та тривалістю його перебування під напругою [1].

Однією з головних причин технологічних втрат є нагрівання провідників під час проходження електричного струму. Величина таких втрат залежить від квадрата сили струму, активного опору провідників і тривалості навантаження. Зростанню втрат сприяють перевантаження електричних мереж, недостатній переріз проводів, нерівномірність фазних навантажень та передавання надлишкової реактивної потужності. Особливої уваги потребують розподільні мережі низької напруги, для яких характерні значна протяжність окремих ліній та нерівномірний розподіл електричного навантаження.

Важливим чинником є технічний стан трансформаторного обладнання. Втрати електроенергії в силових трансформаторах складаються з втрат холостого ходу та навантажувальних втрат. Перші виникають переважно в магнітопроводі трансформатора та залежать від прикладеної напруги, тоді як другі пов'язані з проходженням струму через обмотки. Експлуатація застарілих трансформаторів, їх недостатнє або надмірне завантаження та нераціональні режими роботи можуть збільшувати питомі втрати електроенергії. Тому підвищення ефективності розподільних мереж потребує комплексного застосування технічних та організаційних заходів [2].

Окремим чинником збільшення технологічних втрат є недостатня компенсація реактивної потужності. Її передавання електричними мережами супроводжується зростанням струмового навантаження та додатковими втратами активної потужності. Використання компенсувальних пристроїв дає змогу зменшити перетікання реактивної потужності, поліпшити режим напруги та підвищити пропускну здатність окремих ділянок мережі. Водночас вибір місць установлення та потужності таких пристроїв повинен ґрунтуватися на результатах аналізу фактичних режимів електроспоживання.

Суттєвий вплив на ефективність роботи розподільних електричних мереж має нерівномірність навантаження між фазами. Несиметрія струмів призводить до додаткових втрат у фазних і нульових провідниках, погіршення показників якості електричної енергії та нерівномірного завантаження трансформаторного обладнання. Зменшення зазначених негативних явищ можливе шляхом раціонального перерозподілу однофазних споживачів між фазами та систематичного контролю параметрів електричних мереж.

Перспективним інструментом підвищення ефективності електропостачання є впровадження цифрових технологій моніторингу та автоматизованого контролю. Використання сучасних засобів вимірювання, систем дистанційного збору інформації та програмних комплексів аналізу режимів роботи електричних мереж дає змогу своєчасно виявляти ділянки з підвищеними втратами, оцінювати ефективність технічних заходів та обґрунтовувати управлінські рішення [3].

Для АТ «Житомирobленерго» визначення пріоритетних напрямів зниження технологічних втрат доцільно здійснювати на основі аналізу структури розподільних мереж, технічного стану обладнання, характеру електричних навантажень та результатів розрахунків втрат електроенергії.

Таким чином, зниження технологічних втрат електроенергії в розподільних електричних мережах потребує комплексного підходу, що поєднує оптимізацію режимів роботи, модернізацію обладнання, компенсацію реактивної потужності та впровадження сучасних систем контролю. Для АТ «Житомирobленерго» реалізація обґрунтованого комплексу таких заходів сприятиме підвищенню енергоефективності, зменшенню експлуатаційних витрат і забезпеченню надійного електропостачання споживачів.

Перелік джерел посилань

1. Про затвердження Положення про порядок подання, визначення та затвердження економічних коефіцієнтів нормативних та прогнозованих технологічних витрат електроенергії: постанова НКРЕКП від 27.07.2017 № 981. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0981874-17
2. CEER. 2nd CEER Report on Power Losses. Brussels, 2020. URL: https://www.ceer.eu/publication/2nd-ceer-report-on-power-losses/
3. International Energy Agency. Modernising Grids in the Age of Electricity. Paris: IEA, 2026. URL: https://www.iea.org/reports/modernising-grids-in-the-age-of-electricity

УДК 621.22

ОЦІНКА ПРОЦЕСІВ ЗАВАНТАЖЕНОСТІ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ, ЯК ОСНОВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ

Николин П.М. асистент; Николин У.М., к.т.н., доцент

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна

Електроенергетична система поєднує в собі об’єкти генерації на електростанціях, електричні та теплові мережі, які пов’язані між собою безперервним спільним режимом роботи. Системи електропостачання задіяні в процесі передавання, перетворення та розподілу виробленої електроенергії. На сьогоднішній день основною проблемою в енергетичному господарстві кожної країни є те, що виробництво електрики [1], її левова частина, припадає на невідновлювальні корисні копалини. Тому все більш гострішого акценту набуває питання ефективного використання електроенергії. Збільшення втрат та неефективна робота елементів призводить до порушення технічного стану електроенергетичної системи, а в крайніх випадках до аварій і зниження рівня

надійності. Одним із основних елементів системи електропостачання є силові трансформатори. Через значну зношеність основного обладнання, робота понад нормативний термін експлуатації, невідповідність режиму роботи, відсутність систем моніторингу та своєчасного виявлення неефективної роботи призводить до значної втрати електроенергії на шляху до кінцевого споживача. Найбільший коефіцієнт корисної дії силового трансформатора може досягати 96-99 %. Але це стосується тільки оптимального режиму роботи, для інших режимів роботи, особливо недовантаження, картина кардинально відрізняється. Трансформатори, особливо ті, що мають велику встановлену потужність є надзвичайно дорогими та складними в логістиці та ремонті. Тому їх продовжують експлуатувати якомога довше. Надійність сучасного силового трансформатора значною мірою визначається станом його ізоляції, який, своєю чергою, істотно залежить від режиму навантаження та температурних умов експлуатації. Особливої уваги потребує ввімкнення силових трансформаторів на паралельну роботу як один із важливих режимів їх експлуатації. Паралельна робота двох або більше трансформаторів полягає в їхньому функціонуванні при паралельному з'єднанні обмоток як на первинній, так і на вторинній стороні. При такому з'єднанні однакові затискачі трансформаторів підключаються до одного й того ж проводу мережі. Для паралельної роботи трансформаторів однакової потужності в ефективному режимі роботи, кожен з них повинен бути завантажений однаковим струмом. Для цього має виконуватись ряд вимог [2], одна із яких це рівність величини напруги короткого замикання. На цю величину не часто звертають увагу, особливо в період військових дій, дефіциту силового електрообладнання, яке надається партнерами у вигляді гуманітарної допомоги, характеристики якого не завжди відповідають тому обладнанню що залишилось в роботі. При умові що напруги к.з. не є рівними, то трансформатор з нижчою напругою к.з. буде перевантажений. У даному випадку необхідно зменшити загальне навантаження групи паралельно працюючих трансформаторів, що призведе до неповного використання їх встановленої потужності. Зазвичай приймається, що для трансформаторів однакової потужності й струми навантаження теж однакові, і нагрівання їх обмоток теж рівне. Таке припущення є не зовсім вірним. Тому уточнення режиму навантаження силових трансформаторів, що паралельно працюють на шини уможливить детальніше відобразити розподіл потужностей між ними та збільшить тривалість їхньої роботи.

Ефективним режимом роботи для трансформаторів на підстанції є той де втрати потужності прямують до мінімального значення [3].

Для аналізу режиму роботи паралельнопрацюючих трансформаторів із різними напругами к.з. було розглянуто два трансформатори потужністю ТМ-1000/10 із навантаженням 2350 кВ·А, cosφ = 0,82. Припущення, що режим навантаження є тривалий, неперервний та рівномірний. Проводимо визначення розподілу навантажувального струму при умові, що 1Т має $uk1$ = 5,5%., а 2Т – у 1,1 рази більшу, $U1н$ = 10 кВ; $U2н$=0,4 кВ; $SнI$ = $SнII$ = 1000 кВА. Розрахувавши первинні та вторинні струми в трансформаторах [4] та визначивши потокорозподіл між трансформаторами у відповідності до їх напруг к.з. було отримано такі результати. Силовий трансформатор який працює із меншим

значенняк uk, а це 1Т, буде перевантажуватись 4,79%, а 2Т який працює із більшим значенняк uk матиме недовантаження - 5%.

Висновки

1. Досліджено режими роботи та характеристики трансформаторів із різними напругами к.з. для паралельної роботи в електроенергетичній системі. Встановлено, що потужності розподіляються між паралельнопрацюючими трансформаторами однакової потужності нерівномірно. Перевантажуватись завжди буде той трансформатор в якого напруга к.з має менше значення.

Перелік джерел посилань

1 Загальні відомості про електричні системи і мережі // Основні поняття / Сулейманов В. М., Кацадзе Т. Л.//Електричні системи та мережі частина І - 2012р. – С. 5-6.

2 Романюк Ю.Ф. Електричні системи та мережі: навчальний посібник.– Івано-Франківськ: Факел, 2004.– 272с.

3 Михайлів М.І., Соломчак О.В., Гоголюк П.Ф. Розрахунок електричних навантажень промислових підприємств. – Івано-Франківськ,2003. – 156.

4 Суходоля О. М. Питання енергозбереження в трансформаторах [Текст] / О. М. Суходоля // Электропанорама. – 2002. - №12. – С.43-45.

УДК 621.315.1:621.311.014

МОДЕЛЮВАННЯ КОРОТКИХ ЗАМИКАНЬ У ДОВІЛЬНІЙ ТОЧЦІ ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ НА ОСНОВІ РІВНЯНЬ ДОВГОЇ ЛІНІЇ

Левонюк В. Р., к.т.н., доцент

Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Ґжицького, м. Львів, Україна

Дослідження перехідних електромагнітних процесів у лініях електропередач (ЛЕП) потребує адекватного врахування розподіленого характеру їхніх параметрів. Використання рівнянь довгої лінії дає змогу визначати миттєві значення напруг та струмів уздовж лінії з урахуванням поширення електромагнітних хвиль. Ми під час аналізу процесів у довгих ЛЕП віддаємо перевагу використанню рівняння довгої лінії другого порядку записане відносно координати напруги. Це дискретизоване рівняння буде мати вигляд:

$$\frac{d\mathbf{v}_j}{dt} = \left[\mathbf{LC}\right]^{-1}\left(\frac{1}{\left(\Delta x\right)^2}\left(\mathbf{u}_{j-1} - 2\mathbf{u}_j + \mathbf{u}_{j+1}\right) - \left(\mathbf{Lg} + \mathbf{rC}\right)\mathbf{v}_j - \mathbf{rgu}_j\right),\ \frac{d\mathbf{u}_j}{dt} = \mathbf{v}_j\ ; \quad (12)$$

де Δx – крок дискретизації; N – кількість вузлів дискретизації.

Для розв’язку цих рівнянь нам потрібно мати фіктивні напруги на початку та кінці ЛЕП. Це питання нами неодноразово розв’язувалося шляхом заміни першої та останньої ділянки дискретизації коловим еквівалентом [1]. Моделювання КЗ на початку або в кінці ЛЕП не створює значних труднощів, натомість для відтворення пошкодження всередині лінії необхідно врахувати його вплив на електричні процеси в місці виникнення, не порушуючи при цьому континуального опису інших ділянок. Тому актуальним є розроблення способу, який дає змогу моделювати КЗ у довільному вузлі дискретизації лінії зі збереженням основних переваг моделі з розподіленими параметрами.

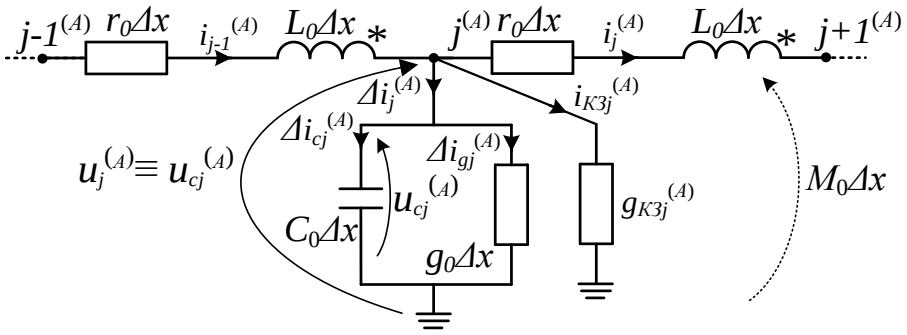


Рис. 1. Схема заміщення ділянки дискретизації лінії для моделювання КЗ

Для розв'язання поставленої задачі пропонується представляти ділянку дискретизації, у межах якої виникає КЗ, у вигляді прямої *Г*-подібної схеми заміщення (рис. 1). Такий підхід дає змогу врахувати особливості електричного з'єднання провідників у місці пошкодження та сформувати відповідні умови для визначення напруг і струмів у вузлі дискретизації [2].

Аналізуючи схему, представлену на рис. 1, бачимо, що напруга *j*-го вузла дискретизації буде рівна напрузі на ємності ($C_0\Delta x$) ділянки дискретизації ($u_j = u_{cj}$):

$$\frac{d\mathbf{u}_{cj}}{dt} = \left[\Delta x \mathbf{C}\right]^{-1} \Delta \mathbf{i}_{cj}, \tag{2}$$

де *j* – номер вузла дискретизації; $\Delta\mathbf{i}_{cj}$ – вектор ємнісних струмів витоку на землю *j*-ї ділянки дискретизації лінії.

На основі першого закону Кірхгофа можемо записати:

$$\Delta\mathbf{i}_{cj} = \mathbf{i}_{j-1} - \Delta\mathbf{i}_{gj} - \mathbf{i}_{КЗj} - \mathbf{i}_j, \qquad \Delta\mathbf{i}_{gj} = \Delta x \mathbf{g} \mathbf{u}_{cj}, \qquad \mathbf{i}_{КЗj} = \mathbf{g}_{КЗj}\mathbf{u}_{cj}; \tag{3}$$

$$\mathbf{i}_{j-1} = \left(i_{j-1}^{(T1)} \quad i_{j-1}^{(T2)} \quad i_{j-1}^{(A)} \quad i_{j-1}^{(B)} \quad i_{j-1}^{(C)}\right)^{\mathrm{T}}, \ \mathbf{i}_j = \left(i_j^{(T1)} \quad i_j^{(T2)} \quad i_j^{(A)} \quad i_j^{(B)} \quad i_j^{(C)}\right)^{\mathrm{T}},$$

$$\mathbf{i}_{КЗ} = \left(i_{КЗ}^{(T1)} \quad i_{КЗ}^{(T2)} \quad i_{КЗ}^{(A)} \quad i_{КЗ}^{(B)} \quad i_{КЗ}^{(C)}\right)^{\mathrm{T}}, \qquad \mathbf{u}_{cj} = \left(u_{cj}^{(T1)} \quad u_{cj}^{(T2)} \quad u_{cj}^{(A)} \quad u_{cj}^{(B)} \quad u_{cj}^{(C)}\right)^{\mathrm{T}}; \tag{4}$$

$$\mathbf{g}_{КЗj} = \begin{array}{|c|c|c|c|c|}
\hline
G11 & -g_{КЗj}^{(T1T2)} & -g_{КЗj}^{(T1A)} & -g_{КЗj}^{(T1B)} & -g_{КЗj}^{(T1C)} \\ \hline
-g_{КЗj}^{(T2T1)} & G22 & -g_{КЗj}^{(T2A)} & -g_{КЗj}^{(T2B)} & -g_{КЗj}^{(T2C)} \\ \hline
-g_{КЗj}^{(AT1)} & -g_{КЗj}^{(AT2)} & G33 & -g_{КЗj}^{(AB)} & -g_{КЗj}^{(AC)} \\ \hline
-g_{КЗj}^{(BT1)} & -g_{КЗj}^{(BT2)} & -g_{КЗj}^{(BA)} & G44 & -g_{КЗj}^{(BC)} \\ \hline
-g_{КЗj}^{(CT1)} & -g_{КЗj}^{(CT2)} & -g_{КЗj}^{(CA)} & -g_{КЗj}^{(CB)} & G55 \\ \hline
\end{array},$$

$$G11 = g_{КЗj}^{(T1G)} + g_{КЗj}^{(T1T2)} + g_{КЗj}^{(T1A)} + g_{КЗj}^{(T1B)} + g_{КЗj}^{(T1C)}, \ G22 = g_{КЗj}^{(T2G)} + g_{КЗj}^{(T2T1)} + g_{КЗj}^{(T2A)} + g_{КЗj}^{(T2B)} + g_{КЗj}^{(T2C)},$$

$$G33 = g_{КЗj}^{(AG)} + g_{КЗj}^{(AT1)} + g_{КЗj}^{(AT2)} + g_{КЗj}^{(AB)} + g_{КЗj}^{(AC)}, \ G44 = g_{КЗj}^{(BG)} + g_{КЗj}^{(BT1)} + g_{КЗj}^{(BT2)} + g_{КЗj}^{(BA)} + g_{КЗj}^{(BC)},$$

$$G55 = g_{КЗj}^{(CG)} + g_{КЗj}^{(CT1)} + g_{КЗj}^{(CT2)} + g_{КЗj}^{(CA)} + g_{КЗj}^{(CB)}, \tag{5}$$

де $g_{КЗj}^{(km)}$ – активна провідність короткого замикання між відповідними провідниками лінії *k* та *m*; $g_{КЗj}^{(kG)}$ – активна провідність короткого замикання між *k*-м провідником та землею *G*.

Відтак, інтегруючи, під час КЗ, рівняння (2), для *j*-го вузла дискретизації, замість (1), маємо змогу враховувати КЗ як для фаз лінії, так і для грозозахисних тросів. Для цього потрібно у матриці $\mathbf{g}_{КЗj}$ задати значення провідності КЗ між відповідною фазою чи ГЗТ ЛЕП та землею (ОКЗ) або між відповідними фазами чи між фазами та ГЗТ ЛЕП.

Запропоновано спосіб моделювання коротких замикань у довільному вузлі дискретизації лінії електропередачі, який ґрунтується на локальному використанні прямої *Г*-подібної схеми заміщення та введенні матриці провідностей пошкодження до рівнянь балансу струмів відповідного вузла. Основною перевагою підходу є можливість урахування різних конфігурацій КЗ, зокрема пошкоджень за участю грозозахисних тросів, без відмови від опису решти лінії на основі рівнянь довгої лінії. Запропонований метод може бути використаний для математичного моделювання перехідних електромагнітних процесів у ЛЕП та дослідження їхнього перебігу за різних видів пошкоджень.

Перелік джерел посилань

1. V. Levoniuk, H. Lysiak, and V. Lysiak, “Features of boundary condition formation for the long transmission line equation using equivalent circuit approaches,” *Advances in electrical and electronic engineering*, vol. 24, no. 2, pp. 135-143, 2026. DOI: 10.15598/aeee.v24i2.250707.

2. V. Levoniuk, A. Chaban, P. Czaja, A. Dydycz, A. Szafraniec, R. Kwiecień, and M. Górska, “The mathematical modeling of a lightning strike in an HVAC line considering the modified Hamilton–Ostrogradsky principle,” *Energies*, vol. 18, no. 24, 6599, 2025. https://doi.org/10.3390/en18246599.

УДК 621.548:004.94

ВПЛИВ ЗАКРИЛОК І КОНФУЗОРА НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВІТРОГЕНЕРАТОРА З ВЕРТИКАЛЬНОЮ ВІССЮ ОБЕРТАННЯ

Баліцький А. С., аспірант; Троханяк В. І., к.т.н., доцент

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

Використання багатолопатевих турбін у системі вітрогенераторів є перспективним рішенням для розвитку нетрадиційних джерел енергії. Водночас низький коефіцієнт їх потужності зумовлює впровадження додаткових методів підвищення ефективності. Застосування каналів конфузорного типу для прискорення потоку повітря, дозволяють збільшити позитивний чистий крутний момент та забезпечують приріст потужності на 20-50% [1], для вітрогенератора поперечного потоку використання конфузора підвищило коефіцієнт C_p з 0,12 до 0,25 [2]. Однак при використанні системи вітрогенераторів, турбіни дещо змінюють потік одна для одної, тому прогнозувати ефективність таких методів дещо важче. Мета роботи – оцінити вплив закрилок і конфузора на пусковий момент, потужність і структуру течії для системи вітрогенераторів з трьома турбінами.

Проведено чисельне дослідження моделі вітрогенератора з двома передніми 6-лопатевими та задньою 7-лопатевою турбіною, радіусом R=0.11 м. Для порівняння розглянуто три різні конфігурації установки: К1 – турбіни без додаткових елементів; К2 – з направляючими закрилками; К3 – із закрилками та конфузором – (ширина входу 0,647 м). Моделювання виконано у програмному пакеті Ansys Fluent 2024 R1 у двовимірній стаціонарній постановці методом множинних систем відліку (MRF). Модель турбулентності SST k–ω [3], з поправкою на кривизну та обертання потоку [4]. Швидкість потоку становила $U_\infty = 5$ м/с ($\mathrm{Re}_D \approx 7{,}5\cdot10^4$), частота обертання $n = 0$–125 об/хв, коефіцієнт

швидкохідності $\lambda = \omega R/U_\infty$ = 0–0,29. Метод MRF дає результат лише для одного положення лопатей, тому кожен режим розраховано для чотирьох положень турбін із кроком 15° для передніх і 12,9° для задньої, а результати усереднено (усього 96 розрахунків). Усі величини наведено на 1 м висоти турбіни.

Розрахунок лише в одному положенні турбін дає ненадійний результат. Пусковий момент К1 залежно від положення змінюється від −2,3 до 66,7 мН·м/м, а в 5 випадках із 20 порівняння конфігурацій дає зворотний висновок (К3 > К2 > К1). Після усереднення за чотирма положеннями порядок стабільний: К1 > К2 > К3. Сумарний пусковий момент К1, К2 і К3 становить 34,6; 11,3 і 7,9 мН·м/м. Максимальна потужність К1 дорівнює 0,0446 Вт/м; закрилки зменшують її в 3,8 раза, а закрилки з конфузором – у 6,5 раза. Потужність установки падає до нуля (холостий хід) за n ≈ 53, 37 і 26 об/хв відповідно.

Причину цьому можна побачити по структурі течії на рис.1. У К1 повітря прискорюється в проміжку між передніми турбінами до 5,5–6,3 м/с, і цей потік набігає на одну половину задньої турбіни. В результаті вона забезпечує 55 % пускового моменту і 64 % потужності всієї установки. У К2 закрилки сповільнюють потік до 3,6–4,0 м/с і відводять його вбік, тож задня турбіна уже при 13–15 об/хв починає гальмувати. У К3 конфузор фактично перекриває потік: багатолопатеві турбіни майже не пропускають повітря крізь себе, а прохід між ними вузький (≈0,12 м при ширині входу 0,647 м). Через це частка повітря, що проходить крізь вхід, падає з 81 % (К1) до 18 % (К3), решта обтікає установку ззовні, а лобова сила тиску потоку на установку зростає в 2,3 раза.

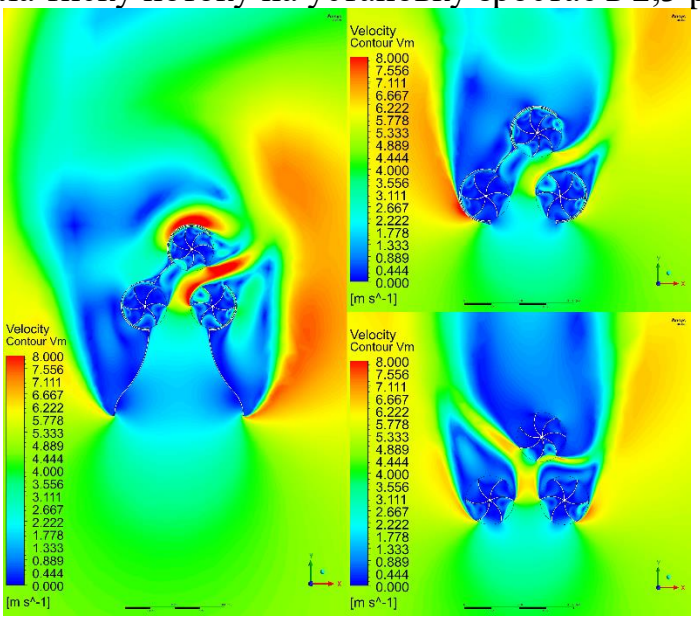


Рис. 1. Поля швидкостей при *n* = 25 об/хв (потік знизу вгору):
ліворуч – К3; праворуч угорі – К2; праворуч унизу – К1

Отже, для порівняння конфігурацій багатолопатевих вітрогенераторів з вертикальною віссю обертання методом MRF, необхідне усереднення за кутовими положеннями турбін. Ключовим чинником роботи системи є потік між передніми турбінами; закрилки й конфузор досліджуваної геометрії негативно вплинули цей механізм, тому для їх удосконалення слід зберегти асиметричне набігання потоку на задню турбіну і збільшити пропускну здатність на виході з конфузора.

Перелік джерел посилань
1. Alom, N.; Saha, U.K. Four Decades of Research into the Augmentation Techniques of Savonius Wind Turbine Rotor. J. Energy Resour. Technol. Trans. ASME 2018, 140, 050801. DOI: 10.1115/1.4038785.
2. Heragy M., Kono T., Kiwata T. Investigating the effects of wind concentrator on power performance improvement of crossflow wind turbine. Energy Conversion and Management. 2022. Vol. 255. Art. 115326. DOI: 10.1016/j.enconman.2022.115326.
3. Menter F. R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. AIAA Journal. 1994. Vol. 32, No. 8. P. 1598–1605. DOI: 10.2514/3.12149.
4. Smirnov P. E., Menter F. R. Sensitization of the SST turbulence model to rotation and curvature by applying the Spalart–Shur correction term. Journal of Turbomachinery. 2009. Vol. 131, No. 4. Art. 041010. DOI: 10.1115/1.3070573.

УДК 004.94:621.311.243:621.316

АГЕНТНА МОДЕЛЬ КЛАСТЕРНОЇ МІКРОМЕРЕЖІ З ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЮ ГЕНЕРАЦІЄЮ, НАКОПИЧЕННЯМ ТА МІЖКЛАСТЕРНИМ ОБМІНОМ ЕНЕРГІЄЮ

Красенко А. О., здобувач вищої освіти гр. АСД-ЕІ25; Бодунов В. М., к.т.н., доцент, науковий керівник
Національний університет "Чернігівська політехніка", (м. Чернігів, Україна)

Інтеграція розподілених фотоелектричних джерел до локальних енергосистем потребує узгодження генерації та споживання, використання накопичувачів і механізмів взаємодопомоги між мікромережами. Агентне моделювання дає змогу досліджувати поведінку таких систем за мінливих погодних умов і навантаження [1].

Модель охоплює декілька кластерів. Кожен містить фотоелектричні панелі, будинки-споживачі та хаб із батареєю. Споживачі поділяються на звичайні й критичні: критичне навантаження не відключається, тоді як звичайне може бути вимкнене за нестачі енергії. Хмари рухаються на схід, змінюють прозорість і послідовно затінюють панелі різних кластерів.

Потужність панелей залежить від часу доби, затінення та системних втрат. Прозорість усіх хмар у межах радіуса затінення перемножується. За відсутності хмар умовна потужність панелі дорівнює 100 одиницям, а за затінення визначається як 10 + 90 × сукупна прозорість; далі враховуються сонячний коефіцієнт і системні втрати. Попит змінюється протягом доби за 24-годинною матрицею з лінійною інтерполяцією або за спрощеною періодичною функцією; додатково вводиться випадкове відхилення в межах ±10 %.

На кожному кроці хаб порівнює генерацію та попит кластера. Надлишок спочатку спрямовується на заряджання локальної батареї з урахуванням ємності, максимальної швидкості заряджання та ККД; залишок доступний для експорту. За дефіциту батарея розряджається з обмеженнями за потужністю й наявним зарядом, а непокритий попит формує потребу в імпорті.

Передбачено два режими міжкластерного обміну. У децентралізованому режимі кластери з найбільшим дефіцитом послідовно отримують енергію від

найближчих кластерів із надлишком. Ураховуються довжина лінії, втрати передачі та гранична пропускна спроможність. У централізованому режимі надлишки й дефіцити об’єднуються у спільний пул, а втрати оцінюються за середньою відстанню між хабами; конкретні маршрути не моделюються [2].

Якщо після балансування й обміну дефіцит зберігається, звичайні споживачі відповідного кластера відключаються у випадковому порядку, доки дефіцит не буде покрито або не залишиться доступного некритичного навантаження. Якщо енергії не вистачає навіть критичним споживачам, напруга знижується за евристичною залежністю; за відсутності дефіциту модель задає 220 В, а після відключення звичайних споживачів — 215 В.

Для аналізу сценаріїв обчислюються сумарні генерація та попит, рівень заряду батарей, втрати передачі й середній показник напруги [3]. Коли хмара затінює один кластер, його дефіцит може бути покритий батареєю та надлишком сусіднього кластера, який ще не затінений. Увечері генерація зменшується, попит наближається до піку, батареї розряджаються, а можливості обміну скорочуються. На рис. 1 наведено скриншота інтерфейсу моделі в NetLogo під час моделювання.

Модель не виконує фізичного розрахунку потокорозподілу, частоти або напруги; рух хмар задано в одному напрямку з однаковою швидкістю; передавання відбувається лише безпосередньо між парами кластерів, без транзиту через проміжні вузли. Одиниці потужності умовні, а відключені будинки продовжують враховуватися в загальному показнику попиту.

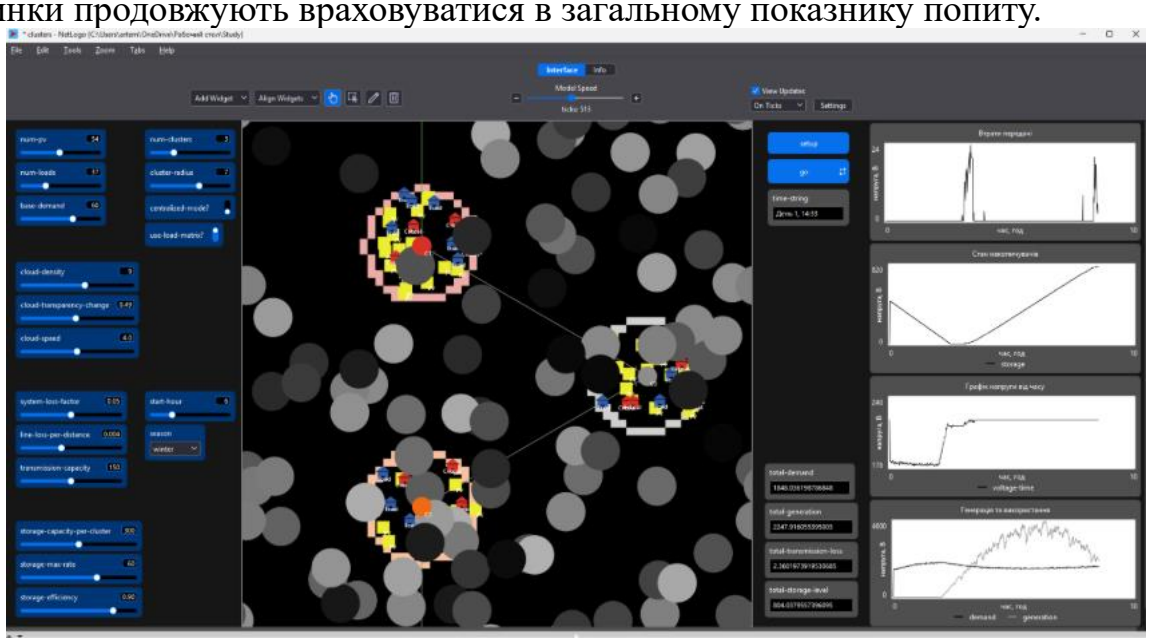


Рис. 1. Візуалізація агентної моделі кластерної мікромережі в середовищі NetLogo.

Перелік джерел посилань

1. Kuznetsova E., Li Y.-F., Ruiz C., Zio E. An integrated framework of agent-based modelling and robust optimization for microgrid energy management. Applied Energy. 2014. Vol. 129. P. 70–88. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.04.024.

2. Muhtadi A., Pandit D., Nguyen N., Mitra J. Distributed Energy Resources Based Microgrid: Review of Architecture, Control, and Reliability. IEEE Transactions on Industry Applications. 2021. Vol. 57, No. 3. P. 2223–2235. DOI: 10.1109/TIA.2021.3065329.

3. Wilensky U. NetLogo. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University. 1999. URL: https://ccl.northwestern.edu/netlogo/ (дата звернення: 19.10.2026).

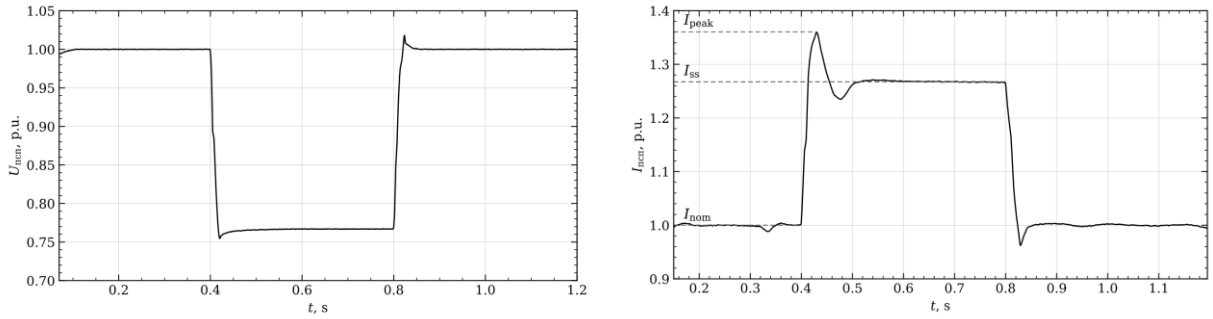
УДК 621.315.21

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ПІД ЧАС ПРОВАЛІВ НАПРУГИ В ЕЛЕКТРИЧНІЙ МЕРЕЖІ З ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЮ СТАНЦІЄЮ

Варецький Ю.О., д.т.н., професор; Максимук О.І., аспірант
Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна.

Провали напруги є одними з найчастіших збурень в електричних мережах. Зростання частки фотоелектричних станцій (ФЕС) у розподільних мережах середньої напруги загострює проблему стійкості їх роботи під час таких збурень [1]. У цьому випадку здатність ФЕС зберігати роботоздатність під час провалів напруги в мережі покращує загальну стійкість енергосистеми, запобігаючи виникненню системної аварії [2, 3]. Під час провалу напруги система керування інвертора намагається зберегти значення активної потужності, що передається в мережу, спричиняючи зростання вихідного змінного струму та напруги на ланці постійного струму. Це може спричинити спрацювання захистів ФЕС від надструму та перенапруги й відключення станції від мережі [4, 5]. Тому важливо ретельно проаналізувати ці процеси ще на етапі проєктування систем керування та захисту ФЕС.

Автори здійснили низку досліджень перехідних процесів у контурі перетворення енергії ФЕС під час провалів напруги та встановили залежності струмів інвертора й напруги ланки постійного струму від глибини провалу, а також проаналізували необхідність додаткових заходів, спрямованих на забезпечення працездатності станції. Дослідження виконано для ФЕС потужністю 1,1 МВт, підключеної до мережі 10 кВ, на моделі, опрацьованій у середовищі MATLAB/Simulink. Розроблена модель, у якій відображено всі елементи ФЕС, дозволяє адекватно відтворювати процеси у мережі з ФЕС у нормальному режимі та під час провалів напруги [6, 7]. Встановлено, що глибина провалу визначає кратність приросту струму інвертора та короткочасне збільшення напруги ланки постійного струму, тому ці процеси необхідно враховувати під час проєктування ФЕС. У момент виникнення провалу напруги інвертор не здатний передати в мережу всю потужність, яку генерують фотоелектричні панелі, тому надлишок енергії накопичується в конденсаторі ланки постійного струму і напруга на ньому зростає. Різке зниження напруги мережі порушує роботу системи керування, спричиняючи перехідний кидок вихідного струму інвертора. На рис.1 показано зміни напруги на шинах підстанції та струму інвертора під час перехідного процесу. Після адаптації контурів регулювання встановлюється нове усталене значення струму, яке забезпечує передачу повної потужності за зниженої напруги.



а *б*

Рис. 1 – Діючі значення напруги на шинах (а) та вихідного струму ФЕС (б)

Аналіз результатів дослідження перехідних процесів для різної глибини провалу напруги в межах 15–90% показав, що пікове діюче значення струму інвертора за помірного провалу зростає до 1,2–1,4 доаварійного значення, а за глибоких провалів може досягати 5,2 доаварійного значення. Інтенсивність збільшення напруги ланки постійного струму та її амплітуда також суттєво залежать від глибини провалу напруги. Таким чином, провали напруги в електричній мережі можуть спричиняти зростання струму інвертора й напруги ланки постійного струму понад допустимі межі. Без додаткових заходів захисту та реконфігурування системи керування в таких умовах ФЕС буде відключатися від мережі.

Перелік джерел посилань

1. E. Munkhchuluun, L. Meegahapola, and A. Vahidnia, "Long-term voltage stability with large-scale solar-photovoltaic (PV) generation," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 117, art. 105663, 2020. DOI: 10.1016/j.ijepes.2019.105663

2. NERC, "1,200 MW Fault Induced Solar Photovoltaic Resource Interruption Disturbance Report: Southern California 8/16/2016 Event," North American Electric Reliability Corporation, Atlanta, GA, USA, Jun. 2017.

3. ENTSO-E, "Grid Incident in Spain and Portugal on 28 April 2025. ICS Investigation Expert Panel Final Report," European Network of Transmission System Operators for Electricity, Brussels, Mar. 2026.

4. K. Zeb, S. U. Islam, I. Khan, W. Uddin, M. Ishfaq, T. D. C. Busarello, S. M. Muyeen, I. Ahmad, and H. J. Kim, "Faults and fault ride-through strategies for grid-connected photovoltaic system: A comprehensive review," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 158, art. 112125, 2022. DOI: 10.1016/j.rser.2022.112125

5. F. Letaief, A. Abdelkhalek, M. Trabelsi, and H. Abu-Rub, "A comprehensive approach to flexible LVRT strategies for inverter-based PPMs enhancing voltage support, overcurrent protection, and DC-link voltage quality," IEEE Access, vol. 12, pp. 48076–48099, 2024. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3381188

6. Ю. Варецький і О. Максимук, «Моделювання перехідних процесів в електричній мережі з фотоелектричною станцією під час провалів напруги», SEPES, С. 53—65, 2026, doi: 10.23939/sepes2026.01.053.

7. O. Maksymuk, "Modeling of control processes for photovoltaic power plants," Energy Engineering and Control Systems, vol. 11, no. 2, pp. 99–108, 2025. DOI: 10.23939/jeecs2025.02.099

УДК 620.92:551.594.1

ЕНЕРГЕТИЧНИЙ КРИТЕРІЙ ДОЦІЛЬНОСТІ АКТИВНОЇ ІОНІЗАЦІЇ В СИСТЕМАХ ВІДБОРУ АТМОСФЕРНОЇ ЕЛЕКТРИКИ

Лисак О. О., аспірант; Мошноріз М. М., к.т.н., доцент

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна.

Активні методи відбору атмосферної електрики передбачають примусову іонізацію повітря біля колектора. Для них авторами запропоновано рівняння енергетичного балансу $P_n = P_h - P_i$, де P_n — чиста потужність для навантаження, P_h — потужність, відібрана з глобального електричного кола, P_i — витрати на іонізацію [1]. Воно вимагає $P_n > 0$, але не показує, коли це досяжне; мета роботи — подати цю умову у формі, зручній для порівняння методів.

Для колектора на висоті h атмосферу можна подати схемою Тевеніна з ЕРС, що приблизно дорівнює потенціалу незбуреного повітря на цій висоті $\Phi(h)$, і внутрішнім опором R_a [2], тож у коло зі струмом I вона передає потужність, не більшу за $\Phi(h)\cdot I$. Віднесемо витрати на іонізацію до одиниці відібраного заряду, увівши питому енергію іонізації $U_i = P_i/I$ (у вольтах). Тоді

$$P_n \le (\Phi(h) - U_i)\cdot I, \qquad (1)$$

і необхідною умовою доцільності будь-якого активного методу є

$$U_i < \Phi(h). \qquad (2)$$

Умова (2) зберігається і в гібридних системах, де іонізацію живить допоміжне джерело, зокрема електростатичний генератор із вітровим приводом [3] (ЕРС U_v, потужність P_v). Їхній баланс $P_n = P_h + P_v - P_i$, але критерієм доцільності тут є вже $P_n > P_v$, бо інакше той самий генератор на узгодженому навантаженні дав би щонайменше P_v. В еквівалентній схемі (рис. 1) витрати на іонізацію виділяються на зоні коронного розряду з напругою U_e між електродом і повітрям: $P_i = U_e\cdot I$, тобто $U_i = U_e$, а напруга навантаження $U_n = \Phi(h) - I\cdot R_a - U_e + U_v$, звідки внесок атмосферного поля

$$P_n - P_v = (\Phi(h) - I\cdot R_a - U_e)\cdot I \qquad (3)$$

за заданої робочої точки розряду не залежить від U_v і додатний лише за $U_e < \Phi(h)$, тобто за (2): генератор лише оплачує іонізацію.

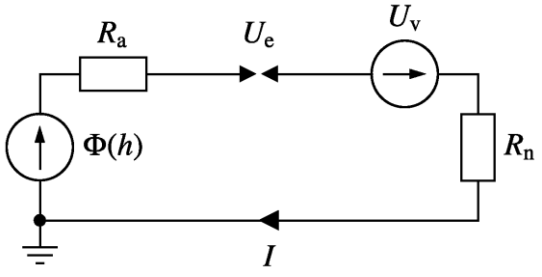


Рис. 1. Еквівалентна схема гібридної системи (R_n — навантаження)

Для коронного розряду струм виникає лише за $U_e > U_0$ (U_0 — напруга запалювання), отже $U_i \ge U_0$. Критична напруженість корони E_k у повітрі за законом Піка — близько 3 МВ/м і зростає зі зменшенням радіуса електрода [4]; для r_e = 0,1 мм екстраполяція дає понад 10 МВ/м, тож навіть для відокремленої сфери $U_0 = E_k\cdot r_e$ — порядку кіловольта, а для вістря на протяжному провіднику ще більше. Водночас за типової біля поверхні напруженості $E_0 \approx 130$ В/м [5]

потенціал $\Phi(h) \approx E_0 \cdot h$ на висоті 10 м — лише близько 1,3 кВ. Тож на висотах звичайних щогл запас $\Phi(h) - U_0$ у кращому разі малий, і для коронної іонізації умова (2) потребує піднятих колекторів або електродів із мінімальною U_0, яку слід визначати експериментально.

Критерій (2) узгоджується й з історичними результатами: у колекторах із радіоактивними іонізаторами, які використовував, зокрема, О. Єфименко [6], іони утворюються за рахунок енергії розпаду без порогової напруги, тож для системи $U_\text{i} \approx 0$ й умова (2) виконується на будь-якій висоті — ціною радіаційної небезпеки. Для термічних і лазерних методів U_i визначають витрати палива чи енергії накачування на одиницю зібраного заряду; їхню доцільність слід перевіряти за тим самим критерієм.

Отже, умова $U_\text{i} < \Phi(h)$ є загальною необхідною умовою енергетичної доцільності активних методів. Для гібридних схем умова $P_\text{v} \geq P_\text{i}$ забезпечує лише $P_\text{n} > 0$, а доцільність визначає умова $P_\text{n} > P_\text{v}$, що для коронної іонізації вимагає $\Phi(h) > U_0$. Згідно з (3), у межах зосередженої моделі послідовний допоміжний генератор не змінює ні знака, ні максимально досяжного внеску атмосферного поля: будь-яку робочу точку з додатним внеском пасивний колектор досягає вибором навантаження. Тож обґрунтування гібридних схем має спиратися на підняті колектори, електроди з мінімальною U_0 та ефекти поза цією моделлю, зокрема перенесення об’ємного заряду вітром.

Перелік джерел посилань

1. Лисак О. О., Мошноріз М. М. Методи відбору атмосферної електрики: обмеження та перспективи розвитку. Матеріали LV Всеукр. наук.-техн. конф. підрозділів Вінницького нац. техн. ун-ту (НТКП ВНТУ–2026). Вінниця : ВНТУ, 2026. URL: https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/book/995 (дата звернення: 28.09.2026).

2. Crowley J. M. The Fair-Weather Atmosphere as a Power Source. Proc. ESA Annual Meeting on Electrostatics 2011. Paper A2. 14 p. URL: https://electrostatics.org/wp-content/uploads/2023/08/2011_A2.pdf (дата звернення: 10.11.2026).

3. Лисак О. О., Мошноріз М. М. Підвищення ефективності систем відбору атмосферної електричної енергії шляхом активної аеродинамічної іонізації. Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2026) : матеріали наук.-практ. інтернет-конф. Вінниця : ВНТУ, 2026. URL: https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2026/paper/download/27830/24775 (дата звернення: 10.11.2026).

4. Peek F. W. Dielectric Phenomena in High-Voltage Engineering. 3rd ed. New York : McGraw-Hill, 1929.

5. Rycroft M. J., Nicoll K. A., Aplin K. L., Harrison R. G. Recent advances in global electric circuit coupling between the space environment and the troposphere. J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2012. Vol. 90–91. P. 198–211. DOI: 10.1016/j.jastp.2012.03.015.

6. Jefimenko O. Operation of Electric Motors from the Atmospheric Electric Field. Am. J. Phys. 1971. Vol. 39, № 7. P. 776–778. DOI: 10.1119/1.1986281.

УДК 621.311.24:621.355

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ФОТОВОЛЬТАЇЧНИХ СИСТЕМ З НАКОПИЧУВАЧЕМ ЕНЕРГІЇ В ЛОКАЛЬНИХ ЕНЕРГОСИСТЕМАХ МАЛИХ НАСЕЛЕНИХ ПУНКТІВ

Лукач А. А.[1], аспірант; Сабо А. Г.[1], к.т.н., доцент

[1]Таврійський державний агротехнологічний університет, м. Запоріжжя, Україна.

Розвиток децентралізованої сонячної генерації в поєднанні з системами накопичення енергії (BESS) є одним із ключових напрямів підвищення енергетичної стійкості малих населених пунктів України, зокрема в умовах нестабільності централізованих електромереж та переходу до механізмів активного споживача й нет-білінгу [1, 2]. Для сільських територій західних областей (зокрема Львівщини) характерні добові та сезонні коливання навантаження, обмежена потужність локальної мережі та необхідність мінімізації витрат на імпорт електроенергії [3, 6].

Метою роботи є обґрунтування оптимальних режимів роботи гібридної фотовольтаїчної системи (ФВС) з акумуляторним накопичувачем для малого населеного пункту шляхом математичного моделювання та порівняння стратегій керування. Постановка задачі передбачає мінімізацію сумарних експлуатаційних витрат з урахуванням тарифу імпорту 4,32 грн/кВт·год (ПСО) та орієнтиру експорту за ціною РДН, вартості циклічної деградації BESS, обмежень SOC (20–90 %), LPSP та обмеження потужності віддачі в локальну мережу [4].

Дослідницький кейс: умовний кластер споживання сільської території Яворівського району Львівської області (~95 екв. домогосподарств); питома вихідна потужність ФВС прийнята 1085 кВт·год/кВт·рік за даними для Львівщини [6]. Для BESS використано модель $LiFePO_4$ ($\eta \approx 92$ %, P_ch/dis≤15 кВт). Порівняно rule-based керування та змішано-цілочисельне лінійне програмування (MILP) [4, 5]. Імітативна модель PV-BESS реалізована в Python (NumPy, PuLP) для установки 50 кВт і BESS 30 кВт·год (експорт ≤12 кВт).

За результатами річного моделювання (365 днів) середній коефіцієнт самоспоживання (SCR) зріс з 90,7 % (rule-based) до 100 % (MILP); річний експорт у мережу зменшено на 10,2 МВт·год (до нуля за MILP), умовні експлуатаційні витрати зменшено на 41,2 тис. грн, середній вечірній пік імпорту (18–21 год) — на 7,5 % при LPSP=0 % [4]. Для ясного літнього дня SCR змінюється з 82,4 до 100 %, пік імпорту — з 32,84 до 27,7 кВт. Аналіз чутливості показав зростання SCR при збільшенні ємності BESS від 15 до 60 кВт·год.

Отримані результати можуть бути використані при проєктуванні мережевих сонячних станцій малої потужності на сільських територіях Львівської області та в подальших дослідженнях з інтеграції ФВС у локальні енергосистеми.

Перелік джерел посилань

1. Директива (ЄС) 2023/2413 Європейського парламенту та Ради щодо сприяння використанню енергії з відновлюваних джерел (RED III).

2. International Renewable Energy Agency (IRENA). Renewable Power Generation Costs in 2021. Abu Dhabi: IRENA, 2022.
3. Sabo A., Lukach A. Development Trends of Autonomous Solar Power Plants for Small Settlements. XVIII Int. Conf., Zaragoza, Spain, 2025.
4. Katiraei F., Iravani M. R. Power management strategies for a microgrid with multiple distributed generation units. IEEE Transactions on Power Systems, 2006. Vol. 21, № 4. P. 1821–1831.
5. Kennedy J., Eberhart R. Particle swarm optimization. Proceedings of ICNN'95, 1995. P. 1942–1948.
6. Climate factors and their role in the solar energy development in the Lviv region. Eco. Energy, 2022. DOI: 10.32846/2306-9716/2022.eco.6-45.9.

УДК 621.548:697.9

КОНЦЕПЦІЯ ВІДБОРУ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПОВІТРЯ ПТАШНИКІВ ДЛЯ РЕКУПЕРАЦІЇ ЕНЕРГІЇ З ВЕРТИКАЛЬНО-ОСЬОВИМИ ВІТРОТУРБІНАМИ

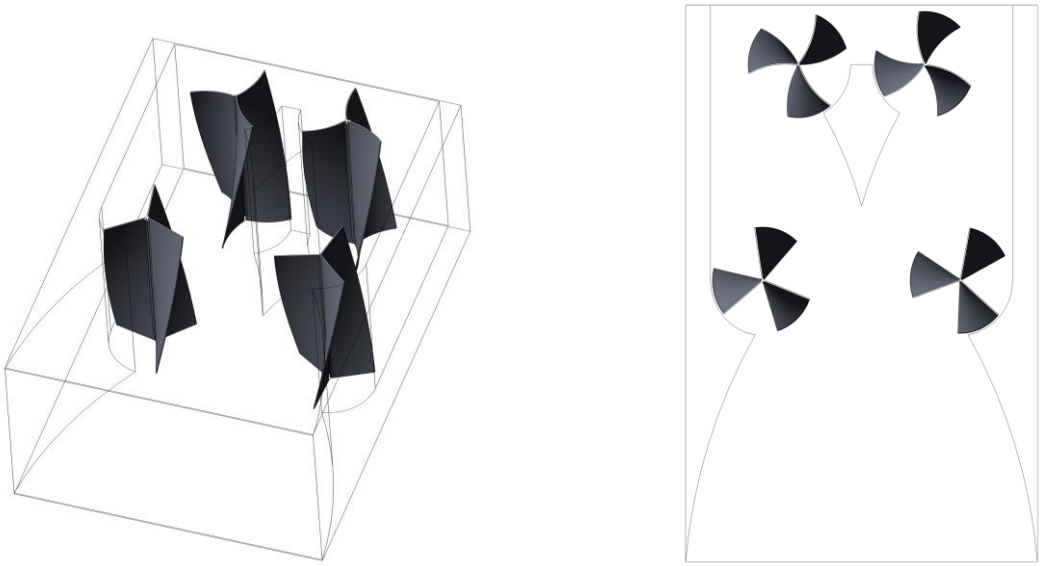
Мартинюк О.В., аспірант Троханяк В.І., канд. техн. наук, доцент
Національний університет біоресурсів і природокористування України, м.Київ, Україна

Актуальність. Мікроклімат у сучасних пташниках регулюється за допомогою тунельної системи вентиляції – низки осьових витяжних вентиляторів, які працюють майже цілий рік. У дальній кінцевій стіні досліджуваного пташника було встановлено вісімнадцять витяжних вентиляторів Munters EM50 (1,5 hp), кожен з яких має продуктивність понад 40 000 м³/год [1]. Вентилятори працюють при негативному тиску приблизно 45 Па, що відповідає технічним вимогам до тунельної вентиляції: це забезпечує рівномірний потік повітря по всій довжині пташника та запобігає проникненню нефільтрованого зовнішнього повітря через щілини у стінах. Кінетична енергія у потоках витяжного повітря, на створення яких вже було витрачено електроенергію, розсіюється в атмосферу. Використовуючи лише частину цієї енергії, можна було б зменшити питоме споживання електроенергії на вентиляцію.

Метою даного дослідження є розробка конструкції системи, що включає вітрогенератори з вертикальною віссю (ВОВТ), встановлені безпосередньо за витяжним вентилятором пташника, та визначення методу пошуку компромісу між вихідною потужністю вітрогенераторів і прийнятним зниженням коефіцієнта повітрообміну.

Подібні приклади та постановка задачі. Питання рекуперації кінетичної енергії з відпрацьованого повітря за допомогою вітрогенераторів у вентиляційних системах вже досліджувалося [2, 3]. Основна відмінність для пташників для бройлерів полягає в тому, що вентилятор працює при постійному негативному тиску. Будь-яке додаткове аеродинамічне навантаження від вітрогенератора зменшує потік повітря через вентилятор, оскільки вентиляція має першочергове значення. Задача оптимізації формулюється як задача максимізації потужності ротора з умовою, що допустиме зменшення потоку повітря не перевищується.

Конфігурація системи. Система (рис. 1) має поперечний переріз, що відповідає розмірам вентилятора (1380 × 1380 мм), і розташована на відстані 0,1–2 м за ним; сусідні агрегати, розміщені один поруч з одним, утворюють суцільний ряд уздовж бічної стіни. Всмоктувальний канал із вигнутими стінками збирає та прискорює потік повітря від вентилятора. За ним розташовані два ряди барабанних блоків ВОВТ діаметром 400 мм. Передній ряд складається з двох роторів, розміщених близько до бічних стін; їхні зовнішні половини укладені в кожухи, завдяки чому повітряний потік діє лише на внутрішні половини, які рухаються разом із потоком повітря. Задній ряд складається з двох роторів, нахилених відносно осі блоку; між ними розташований центральний клин з увігнутими боками, який розділяє центральну частину повітряного потоку, охоплює внутрішні половини задніх роторів і направляє повітря на їхні зовнішні, активні половини. Принцип дії однаковий у всіх чотирьох системах ВОВТ: повітряний потік діє лише на ту половину ротора, яка рухається у напрямку потоку. Ротори в кожній парі обертаються в протилежних напрямках, тим самим компенсуючи бічні сили.



а *б*

Рис. 1. Модель установки: а - загальний вигляд (конфузор показано контурами граней); б - вигляд у плані (потік знизу вгору)

Параметрична модель. Геометрія установки описується параметричною моделлю в програмі SolidWorks: чотирнадцять проектних змінних визначаються безрозмірними коефіцієнтами з рівняннями обмежень, що забезпечують правильну геометрію для будь-якої комбінації цих змінних. До змінних належать відстань між рядами ротора, параметри центральної конічної секції, зміщення задніх роторів, розміри вхідного каналу, відстань між передніми роторами, кількість і кривизна лопатей для кожного ряду окремо, а також відстань від вентилятора до корпусу. Модуль підключено до ANSYS Workbench, завдяки чому геометрія та обчислювальна сітка генеруються автоматично для кожного варіанту.

Метод оптимізації. Чисельне моделювання виконується у двовимірній конфігурації в ANSYS Fluent [4]: нестаціонарна, перехідна задача з обертовою

сіткою при заданій швидкості обертання ротора та з використанням моделі SST k–ω для турбулентного потоку. Вентилятор визначається його характеристикою «тиск–потік», яка була виміряна в акредитованій лабораторії (лабораторія BESS, випробування 02332) [1] з урахуванням перепаду тиску 45 Па; отже, розрахунок дає як потужність ротора, так і нову точку на характеристичній кривій вентилятора, тобто фактичне зменшення витрати. Перша частина полягає в проектуванні остаточної решітки [5] (29 розрахунків для 14 змінних), що дозволяє визначити параметри, які мають найбільший вплив. Далі проводиться точний аналіз відгуку та оптимізація в ANSYS DesignXplorer на основі поверхні відгуку. Критеріями оптимізації є загальна потужність ротора та відносне зменшення витрати повітря вентилятора. Оптимальна геометрія буде випробувана на лабораторному прототипі.

Висновок. Запропонована концепція, що передбачає встановлення блоку ВОВТ за витяжним вентилятором пташників, поєднує концентрацію повітряного потоку через формований дифузор із захистом, що забезпечується задніми півсферами ротора, що дозволяє використовувати кінетичну енергію витяжного повітря, яка в іншому випадку розсіювалася б в атмосфері. Найбільш суттєвою відмінністю порівняно з існуючими рішеннями щодо охолодження є суворе технологічне обмеження щодо зменшення потоку повітря, що визначає задачу примусової оптимізації. Параметричне моделювання потоку в системах SolidWorks–ANSYS дає змогу провести систематичне дослідження з метою знаходження компромісу між споживаною потужністю та потоком повітря у пташниках.

Перелік джерел посилань

1. BESS Lab. Fan test report No. 02332. Bioenvironmental and Structural Systems Laboratory, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2002. URL: http://bess.illinois.edu/pdf/02332.pdf

2. Fazlizan A., Chong W.T., Yip S.Y., Hew W.P., Poh S.C. Design and experimental analysis of an exhaust air energy recovery wind turbine generator. Energies. 2015. Vol. 8, No. 7. P. 6566--6584. DOI: https://doi.org/10.3390/en8076566.

3. Tabatabaeikia S., Nik-Ghazali N., Chong W.T., Shahizare B., Fazlizan A., Esmaeilzadeh A., Izadyar N. Computational and experimental study of the exhaust air energy recovery wind turbine. Energy Conversion and Management. 2016. Vol. 126. P. 862--874. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.08.054.

4. Ansys Fluent Theory Guide. Release 2024 R1. Canonsburg, PA: ANSYS, Inc., 2024. 1144 p.

5. Jones B., Nachtsheim C.J. A class of three-level designs for definitive screening in the presence of second-order effects. Journal of Quality Technology. 2011. Vol. 43, No. 1. P. 1--15. DOI: https://doi.org/10.1080/00224065.2011.11917841.

УДК 621.314.5:621.311.243

ОСОБЛИВОСТІ ВИБОРУ ГІБРИДНИХ ІНВЕРТОРІВ ДЛЯ ОСТРІВНОГО РЕЖИМУ СИСТЕМИ МІКРОГЕНЕРАЦІЇ БАГАТОКВАРТИРНОГО БУДИНКУ

Петрова К. Г., к.т.н., доцент; Дигас Р. Г., здобувачка вищої освіти

Центральноукраїнський національний технічний університет,

м. Кропивницький, Україна.

Під час відключень мережі загальнобудинкові електроприймачі багатоквартирного будинку живляться від гібридних інверторів системи мікрогенерації в острівному режимі. Їхню потужність зазвичай обирають за навантаженням або потужністю сонячної електростанції (СЕС), хоча в острівному режимі визначальними є пуск двигунів ліфтів, ККД за малого навантаження та обмежений струм короткого замикання [1].

Метою роботи є обґрунтування потужності гібридних інверторів і захисту шини критичних навантажень з урахуванням особливостей острівного режиму.

Об’єктом дослідження є дев’ятиповерховий будинок на 72 квартири в м. Кропивницькому з двома ліфтами, обладнаними двошвидкісними двигунами 5,5 кВт. Погодинний максимум загальнобудинкового навантаження становить лише 5,2 кВт, а пуск асинхронного двигуна потребує повної потужності

$$S_{\text{п}} = k_{\text{п}} P_{\text{н}} / (\eta_{\text{н}} \cos \varphi_{\text{н}}), \qquad (1)$$

де $k_{\text{п}}$ – кратність пускового струму; $P_{\text{н}}$, $\eta_{\text{н}}$, $\cos \varphi_{\text{н}}$ – номінальні параметри двигуна. За $k_{\text{п}}$ = 4,5 пускова потужність становить 35,5 кВ·А, а з частотним перетворювачем ($k_{\text{п}}$ = 1,5) – 11,8 кВ·А. З урахуванням допустимого перевантаження інверторів $k_{\text{пер}}$ = 1,5 їхня потужність має задовольняти умову

$$P_{\text{inv}} \geq \max\{P_{\text{ш,max}}; (S_{\text{п}} + P_{\text{ш,max}} - P_{\text{L,н}})/k_{\text{пер}}\}, \qquad (2)$$

де $P_{\text{ш,max}}$ – найбільша потужність шини критичних навантажень; $P_{\text{L,н}}$ – номінальна потужність двигуна. Для двошвидкісних двигунів це 32 кВт, тобто вшестеро більше за погодинний максимум, а з частотними перетворювачами – 18 кВт.

Проте потужність СЕС обмежує не лише покрівля (50 кВт-пік), а й допустиме відношення потужностей модулів та інверторів k_{DC} = 1,5, тому інвертори 20 кВт дозволяють приєднати лише 30 кВт-пік. Раціональні конфігурації, отримані повним перебором обладнання, порівняно в таблиці 1.

Попри менші капітальні витрати, варіант з частотними перетворювачами має на 62 тис. грн більші додаткові приведені витрати ΔNPC за 20 років: потужніші інвертори дають змогу використати всю покрівлю, і додатковий відпуск електроенергії компенсує їхню вартість. Тому модернізацію ліфтів слід обґрунтовувати її власним ефектом. Водночас інвертори 35 кВт уночі завантажені лише на 6–9 % і за моделлю з втратами неробочого ходу 0,8 % [2] мають ККД 88–91 % проти 97 % за завантаження 50 %.

Таблиця 1 – Вплив приводу ліфтів на параметри системи

Показник	**Двошвидкісні двигуни**	**Частотні перетворювачі**
Пускова потужність $S_{\text{п}}$, кВ·А	35,5	11,8
Потрібна потужність інверторів, кВт	32	18
Обрана потужність інверторів, кВт	35	20
Гранична потужність СЕС, кВт-пік	50	30
Накопичувач LFP, кВт·год	60	60
Капітальні витрати, тис. грн	1738,5	1504,0*
Приведені витрати ΔNPC, тис. грн	1109	1171
ККД інверторів уночі (2–3 кВт), %	88–91	92–95

* – з частотними перетворювачами для двох ліфтів.

Другою особливістю острівного режиму є малий струм короткого замикання, який обмежує інвертор. Для інверторів 35 кВт номінальний фазний струм $I_{ном} = P_{inv}/(3U_ф) = 50{,}7$ А, а струм короткого замикання зазвичай не перевищує двократного, тобто $I_к \approx 101$ А. Електромагнітний розчіплювач автоматичного вимикача спрацьовує, якщо

$$I_к \geq k_e I_н, \qquad (3)$$

де k_e – кратність струму миттєвого спрацювання (5 для характеристики B, 10 для C); $I_н$ – номінальний струм вимикача. Для лінії ліфта з вимикачем 25 А потрібно 125–250 А, тому нормований час вимкнення 0,4 с [3] не забезпечується. Умова (3) виконується лише для вимикачів до 16 А характеристики B. Отже, лінії шини критичних навантажень слід захищати пристроями захисного вимкнення (30 мА для розеткових і освітлювальних груп, 300 мА для ліфтів і насосів), дія яких не залежить від потужності джерела. Від зворотного живлення мережі захищають антиострівний захист інверторів [4] і механічне блокування між мережевим вводом і вводом пересувного генератора.

Отже, в острівному режимі потужність гібридних інверторів визначає пуск ліфтів, і разом з відношенням потужностей СЕС та інверторів вона задає граничну потужність станції, а обмежений струм короткого замикання робить обов’язковими пристрої захисного вимкнення.

Перелік джерел посилань

1. Masters G. M. Renewable and Efficient Electric Power Systems. 2nd ed. Hoboken : John Wiley & Sons, 2013.
2. Driesse A., Jain P., Harrison S. Beyond the curves: Modeling the electrical efficiency of photovoltaic inverters. 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference. San Diego, 2008. P. 1–6.
3. IEC 60364-4-41:2005+AMD1:2017. Low-voltage electrical installations – Part 4-41: Protection for safety – Protection against electric shock. Geneva : IEC, 2017.
4. EN 50549-1:2019. Requirements for generating plants to be connected in parallel with distribution networks – Part 1: Connection to a LV distribution network – Generating plants up to and including Type B. Brussels : CENELEC, 2019.

УДК 621.311.24

ТЕХНІЧНІ ОБМЕЖЕННЯ ТА УМОВИ ІНТЕГРАЦІЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ У РОЗПОДІЛЬНІ МЕРЕЖІ

Потапенко М.В., к.т.н., доцент; Шаршонь В.Л., старший викладач
Відокремлений підрозділ Національного університету біоресурсів і природокористування України «Бережанський агротехнічний інститут», м. Бережани, Україна.

Зростання встановленої потужності відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) є одним із ключових напрямів розвитку сучасних енергетичних систем. Особливого поширення у розподільних електричних мережах набувають фотоелектричні системи (ФЕС), що зумовлено доступністю сонячного ресурсу, можливістю децентралізованого виробництва електроенергії та швидкою адаптацією генерації до зміни умов експлуатації.

Інтеграція розподіленої фотоелектричної генерації сприяє підвищенню ефективності використання електричних мереж, зменшенню втрат електроенергії, скороченню викидів парникових газів та підвищенню енергетичної стійкості. Водночас значне збільшення частки ФЕС створює низку технічних проблем, пов'язаних із забезпеченням надійності, допустимих рівнів напруги та стабільності режимів роботи розподільних мереж [1].

Ефективність інтеграції ФЕС доцільно оцінювати з урахуванням обмежень за потужністю, надійністю та якістю електропостачання. Зокрема, умовою допустимої інтеграції є співвідношення:

$$P_{\text{ФЕС}} < P_{\text{доп}}, \quad (1)$$

де $P_{\text{ФЕС}}$ – потужність, що генерується фотоелектричними станціями; $P_{\text{доп}}$ – допустима потужність для інтеграції в мережу.

Для забезпечення надійної роботи мережі необхідно дотримуватися допустимих меж потужності:

$$P_{min} < P_{\text{м}} < P_{max}, \quad (2)$$

де P_{min} та P_{max} – мінімальне та максимальне допустимі значення потужності в мережі.

Не менш важливим критерієм є якість електропостачання, зокрема підтримання напруги в установлених межах:

$$V_{min} < V_{\text{м}} < V_{max}, \quad (3)$$

де V_{min} та V_{max} – мінімальне та максимальне допустимі значення напруги в мережі.

Збільшення кількості ФЕС у розподільних мережах призводить до зміни напрямків і величини потоків активної та реактивної потужності [2]. На відміну від традиційної централізованої генерації, фотоелектричні установки характеризуються змінним режимом роботи, що безпосередньо залежить від рівня сонячної інсоляції. У періоди високої генерації можливе підвищення напруги у вузлах мережі та перевищення допустимих значень, тоді як за недостатньої сонячної активності виникає необхідність у забезпеченні додаткової потужності від інших джерел.

Для підтримання нормативних параметрів електричної мережі можуть застосовуватися трансформатори з регулюванням коефіцієнта трансформації під навантаженням, пристрої компенсації реактивної потужності, а також сучасні інверторні системи з функціями регулювання реактивної потужності та напруги. Застосування таких технічних засобів дає змогу підвищити стійкість режимів роботи ФЕС і забезпечити належні параметри електропостачання як у локальній, так і у вищій за напругою частині розподільної мережі.

Важливим показником ефективності впровадження ФЕС є зміна коефіцієнта завантаження силових трансформаторів розподільних підстанцій. Зниження навантаження трансформаторів у періоди локального споживання електроенергії від ФЕС може сприяти підвищенню ефективності використання мережевого обладнання та зменшенню втрат електроенергії. Водночас надмірна встановлена потужність ФЕС може спричинити зворотні перетоки потужності та створити додаткові експлуатаційні обмеження.

Величину електричної потужності, що генерується фотоелектричною системою, можна визначити за залежністю:

$$P_{PV} = I_S \cdot A \cdot \eta_{PV} \cdot k_L, \quad (4)$$

де I_S – сонячна інсоляція, Вт/м^2; A – сумарна площа поверхні сонячних панелей, м^2; η_{PV} – ККД фотоелектричних панелей; k_L – коефіцієнт, що враховує системні втрати, зокрема втрати в кабельних лініях та інверторах, температурні втрати, забруднення поверхні панелей та інші експлуатаційні фактори.

Технічна ефективність інтеграції ФЕС у розподільні електричні мережі визначається не лише величиною встановленої потужності фотоелектричної генерації, а й її відповідністю пропускній здатності мережі, характеристикам навантаження та допустимим параметрам режиму. Під час проєктування необхідно комплексно оцінювати вплив ФЕС на рівні напруги, перетоки активної та реактивної потужності, завантаження трансформаторів і надійність електропостачання.

Інтеграція фотоелектричних систем є перспективним напрямом модернізації розподільних електричних мереж. За умови належного врахування технічних обмежень і використання сучасних засобів регулювання ФЕС можуть підвищити ефективність функціонування мереж, зменшити негативний вплив енергетики на довкілля та сприяти підвищенню енергетичної незалежності.

Перелік джерел посилань

1. Arefifar S.A., Paz F., Ordonez M. Improving solar power PV plants using multivariate design optimization. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. 2017. Vol.5(2). P.638-650.

2. Лежнюк П.Д., Кулик В.В., Бурикін О. Б. Взаємовплив електричних мереж і систем в процесі оптимального керування їх режимами: монографія. Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. 123 с.

УДК 620.91

ПІДВИЩЕННЯ СТАБІЛЬНОСТІ ГЕНЕРАЦІЇ ЕНЕРГОУСТАНОВОК З ВІДНОВЛЮВАЛЬНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ

Рамш В.Ю., к.т.н., доцент; Потапенко М.В., к.т.н., доцент

Відокремлений підрозділ Національного університету біоресурсів і природокористування України «Бережанський агротехнічний інститут», м. Бережани, Україна.

Відновлювані джерела енергії (ВДЕ) багаточисельні і за своєю фізичною сутністю дуже різноманітні. Незважаючи на значний потенціал ВДЕ, їх широке застосування стримується рядом технічних та економічних факторів [1].

Однією з основних проблем більшості енергоустановок на основі ВДЕ є непостійність і недостатня прогнозованість вихідної потужності, зумовлені залежністю процесу генерації від зовнішніх природних факторів. Для вітроенергетичних установок (ВЕУ) основним визначальним чинником є швидкість вітру, тоді як для фотоелектричних енергетичних установок (ФЕУ) – інтенсивність сонячного випромінювання, тривалість світлового дня, погодні умови та температура навколишнього середовища.

Нестабільність генерації ВДЕ може бути кількісно оцінена за допомогою коефіцієнта варіації потужності [2]:

$$C_V = \frac{\sigma_P}{\bar{P}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

де C_V – коефіцієнт варіації вихідної потужності; σ_P – середньоквадратичне відхилення потужності; $\bar{P}$ – середнє значення вихідної потужності за визначений період.

Чим більшим є значення C_V, тим вищою є мінливість генерації та, відповідно, потреба в резервуванні потужності, накопиченні енергії або використанні інших способів балансування.

Для ВЕУ та ФЕУ характерні різні часові та фізичні закономірності зміни потужності. При цьому фактори, що визначають генерацію вітрових і сонячних установок, у багатьох випадках мають низьку кореляцію. Це створює передумови для їх комбінованого використання у складі гібридних вітро-сонячних енергетичних установок. У такому випадку зниження генерації одного джерела частково компенсується збільшенням генерації іншого, що сприяє вирівнюванню сумарної вихідної потужності.

Нестабільний характер генерації ВДЕ може бути компенсований декількома основними способами.

По-перше, можливе підключення енергоустановок до розгалужених електричних мереж. У цьому випадку територіальна неоднорідність природних умов дає змогу частково компенсувати локальні коливання генерації. Наприклад, зниження виробітку електроенергії на ВЕУ в одному районі через послаблення вітру може компенсуватися генерацією інших установок, розташованих у районі з більш сприятливими вітровими умовами. Водночас такий підхід потребує розвитку мережевої інфраструктури, резервування потужності та супроводжується додатковими втратами під час передавання електроенергії. Перспективним напрямом підвищення ефективності такого підходу є впровадження технологій Smart Grid, які забезпечують інтелектуальне керування потоками енергії та сприяють інтеграції значної частки ВДЕ в електроенергетичну систему.

По-друге, нестабільність генерації ВДЕ може компенсуватися за рахунок резервних потужностей традиційної генерації, зокрема теплових електростанцій [3]. Для автономних енергетичних систем як резервне джерело часто застосовуються дизель-генераторні установки. Проте висока вартість палива, експлуатації та технічного обслуговування дизель-генераторів знижує економічну ефективність таких гібридних систем.

По-третє, для компенсації нестабільності генерації застосовуються системи накопичення енергії. Вони дають змогу накопичувати надлишкову електроенергію в періоди високої генерації та використовувати її під час зниження виробітку.

Основними недоліками систем накопичення є значна початкова вартість, обмежений ресурс роботи, втрати енергії під час заряджання та розряджання, а також необхідність застосування додаткового перетворювального обладнання.

Повністю виключити необхідність накопичення та резервування енергії в системах з ВДЕ, ймовірно, неможливо. Однак їх потребу та відповідні капітальні витрати можна істотно зменшити шляхом раціонального комбінування відновлюваних джерел різної фізичної природи.

Одним із найбільш перспективних напрямів є створення гібридних енергетичних установок, у яких переваги одного виду ВДЕ компенсують недоліки іншого. Зокрема, у вітро-сонячних установках періоди низької сонячної генерації можуть частково компенсуватися підвищенням виробітку електроенергії вітроенергетичною установкою, і навпаки. Це дозволяє зменшити амплітуду коливань сумарної потужності та підвищити коефіцієнт використання встановленої потужності.

Таким чином, комбінування ВДЕ різної фізичної природи є одним із найбільш раціональних способів підвищення стабільності генерації без пропорційного збільшення ємності накопичувачів та резервних потужностей**.** Подальше підвищення ефективності таких систем пов'язане з оптимізацією співвідношення встановлених потужностей окремих генераторів, урахуванням кореляції їх графіків генерації та застосуванням інтелектуальних систем керування енергопотоками.

Перелік джерел посилань

1. Кудря С. О. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії: підручник. К.: НТУУ «КПІ», 2012. 492 с.

2. Sinha S., Chandel S. S. Review of recent trends in optimization techniques for solar photovoltaic-wind based hybrid energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. Vol. 50. P. 755-769.

3. Кузнєцов М. П. Особливості комбінованих енергосистем з відновлюваними джерелами енергії: монографія. К.: ІВЕ НАН України, 2022. 152 с.

УДК 621.311.22:621.316.925:621.316.97

КОМПЛЕКСНА МОДЕРНІЗАЦІЯ ВІДКРИТОГО РОЗПОДІЛЬЧОГО ПРИСТРОЮ 220 КВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТЕПЛОВОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

Семенов А. О.[1], канд. фіз.-мат. наук, доцент; Семенова Н. В.[2]

[1]Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, Україна

[2]Полтавський ливарно-механічний завод, м. Полтава, Україна

Надійність високовольтного обладнання електростанцій є важливою передумовою стійкої роботи об’єднаної енергосистеми України. Відкриті розподільчі пристрої (ВРП) напругою 220 кВ забезпечують видачу потужності теплових електростанцій (ТЕС) до електричних мереж. Тривала експлуатація комутаційної та вимірювальної апаратури, старіння ізоляції й недостатні можливості діагностики підвищують ризики аварійних відключень і витрати на ремонт. Тому модернізація ВРП має охоплювати не лише заміну силового обладнання, але й удосконалення релейного захисту, автоматики та дистанційного моніторингу. Дослідження втрат електроенергії в розподільчих

мережах засвідчують важливість обґрунтованого вибору комутаційних апаратів і технічного обслуговування для підвищення ефективності електропостачання [3].

Метою роботи є обґрунтування комплексного технічного рішення модернізації ВРП 220 кВ ТЕС з урахуванням розрахункових аварійних режимів, вимог електробезпеки та економічної доцільності. Основу дослідження становлять аналіз технічного стану устаткування, визначення струмів короткого замикання відповідно до підходів IEC 60909, порівняльне оцінювання електричних апаратів, розрахунок заземлення та грозозахисту і техніко-економічне оцінювання [1, 2].

За матеріалами вихідного дослідження встановлено, що обладнання аналізованого ВРП експлуатується понад нормативний строк. Зокрема, повітряні вимикачі ВВН-220-15, роз'єднувачі РДЗ-1-220/3200 та трансформатори струму ТФЗМ-220 мають значний фізичний і моральний знос. Наведені у статті дані експлуатаційної служби свідчать про збільшення кількості аварійних відключень із 3–4 до 7–8 на рік протягом 2020–2025 рр. Ці вихідні дані та параметри реконструкції наведено в дослідженні [1].

Розрахунки аварійних режимів дали змогу визначити трифазні струми короткого замикання в характерних точках мережі: 34,05 кА у точці $К_1$ та 21,62 кА у точці $К_2$. Для найбільш несприятливого режиму наведено ударний струм близько 84 кА. Отримані значення використано як вихідні критерії для вибору обладнання за комутаційною здатністю, термічною та електродинамічною стійкістю. Розрахункову основу та отримані значення викладено в [1].

Для технічного переоснащення запропоновано застосувати елегазові вимикачі HPL-245B1, роз'єднувачі SGF-245, трансформатори струму IMB-245, трансформатори напруги CPA-245 та обмежувачі перенапруг PEXLIM. Перехід до сучасної апаратури забезпечує можливість контролю її стану та скорочення обсягу регламентного обслуговування. Передбачено цифровізацію релейного захисту та автоматики (РЗА) з інформаційним обміном на основі IEC 61850 і передаванням технологічних даних до SCADA/EMS [2, 4]. Перспективи цифрової діагностики та інтеграції комутаційних апаратів із системами моніторингу розглянуто також у дослідженні інтеграції вакуумних вимикачів і систем контролю [4].

Окремо оцінено заходи електробезпеки. Згідно з розрахунками, використання заземлювального пристрою з 101 вертикальним електродом довжиною 7 м у поєднанні з горизонтальними провідниками забезпечує розрахунковий опір розтікання близько 0,14 Ом. Для грозозахисту передбачено 28 стрижневих громовідводів висотою 25 м; у вихідному проєкті для контрольної висоти 11 м отримано орієнтовний радіус зони захисту 17 м. Остаточна конфігурація цих систем потребує перевірки відповідно до фактичного плану ВРП та чинних нормативних вимог.

Таким чином, комплексна модернізація ВРП 220 кВ на основі технічно обґрунтованого вибору комутаційного обладнання, цифрової РЗА, систем моніторингу, заземлення та грозозахисту створює передумови для підвищення надійності видачі потужності ТЕС. Практичне значення запропонованого підходу полягає у можливості його застосування під час підготовки проєктів

оновлення високовольтних розподільчих пристроїв інших енергетичних об’єктів України.

Перелік джерел посилань

1. Цицак Т. П., Семенова Н. В., Семенов А. О. Підвищення надійності розподільчого пристрою 220 кВ на тепловій електростанції шляхом модернізації. Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки. 2025. Вип. 51. С. 127-133. https://doi.org/10.31498/2225- 6733.51.2025.344826.

2. IEC 60909-0:2016. Short-circuit currents in three-phase a.c. systems. Part 0: Calculation of currents. Geneva: IEC, 2016.

3. Семенов А. О., Павленко В. М., Скрипник В. О. Інтелектуалізація вакуумних вимикачів у мережах середньої та високої напруги. Енергетика і автоматика, 2026. № 2. С. 138-146. https://doi.org/10.31548/energiya2(84).2026.138.

4. Семенов А. О., Арендаренко В. М., Харак Р. М., Вовк В. О. Сучасний стан інтеграції вакуумних вимикачів і систем контролю в електричних мережах середньої та високої напруги. Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. 2026. № 1 (12). С. 118–124. https://doi.org/10.20998/EREE.2026.1(12).359791.

УДК 628.477:662.6

ОПТИМІЗАЦІЯ СКЛАДУ, ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ТА КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ ТВЕРДОГО ПАЛИВА З ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ І ДЕРЕВНИХ ПЕЛЕТ

Чупа В. М., доктор філософії, доцент

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна

Майже всі побутові відходи Івано-Франківської області захоронюються, хоча 64–68 % їхньої маси придатні для отримання енергії. Горюча фракція відходів полігону в с. Рибне має теплоту згоряння 18,1 кДж/г, як і деревні пелети, але вищі зольність, вологість і викиди SO_2 та NO [1], тому її доцільно спалювати в суміші з пелетами.

Багатокритеріальна оптимізація за теплотою згоряння, концентрацією NO і вартістю енергії показала, що оптимальною є композиція з 10 % пластику, 50 % пелет і 40 % суміші відходів: розрахункова теплота згоряння – 20,1 кДж/г з розширеною невизначеністю ±1,2 % (P = 0,95) [2], концентрація NO – не вище 27 мг/м³. За класифікацією [3] суміш попередньо відповідає класу 3. З урахуванням невизначеності вхідних даних частку пластику доцільно підтримувати в межах 7–10 %. Теплова енергія з неї на 34–41 % дешевша, ніж із пелет (табл. 1).

Таблиця 1 – Вартість теплової енергії: оптимізована суміш і пелети

Ціна пелет, грн/т	Собівартість суміші, грн/т	Суміш, грн/ГДж	Пелети, грн/ГДж	Економія, %
8000	5900	293	444	34
10 000	6900	343	555	38
12 000	7900	393	666	41

Лінія продуктивністю 4000 т/рік за капітальних витрат 3–8 млн грн окупається за 0,3–1,6 року, відводить від захоронення 2000 т відходів на рік і зменшує викиди парникових газів приблизно на 1050 т CO_2-екв. на рік порівняно з чистими пелетами [4]. Моделювання методом Монте-Карло (20 000 сценаріїв)

дає ймовірність збиткової роботи 8,6 %; найсильніше маржа залежить від ціни продажу палива та його теплоти згоряння.

Для стабільної якості палива запропоновано трирівневий контроль (вхідний, оперативний, референтний) та інформаційно-вимірювальну систему (ІВС), у якій каналом непрямого вимірювання теплоти згоряння є нейромережа MLP 6-36-1, навчена на 160 паралельних вимірюваннях. Вона прогнозує теплоту згоряння за викидами, вологістю і зольністю з середньою відносною похибкою 3,7 % (рис. 1). Двоконтурний алгоритм коригує склад суміші: теплоту згоряння регулюють часткою пластику, викиди – часткою пелет.

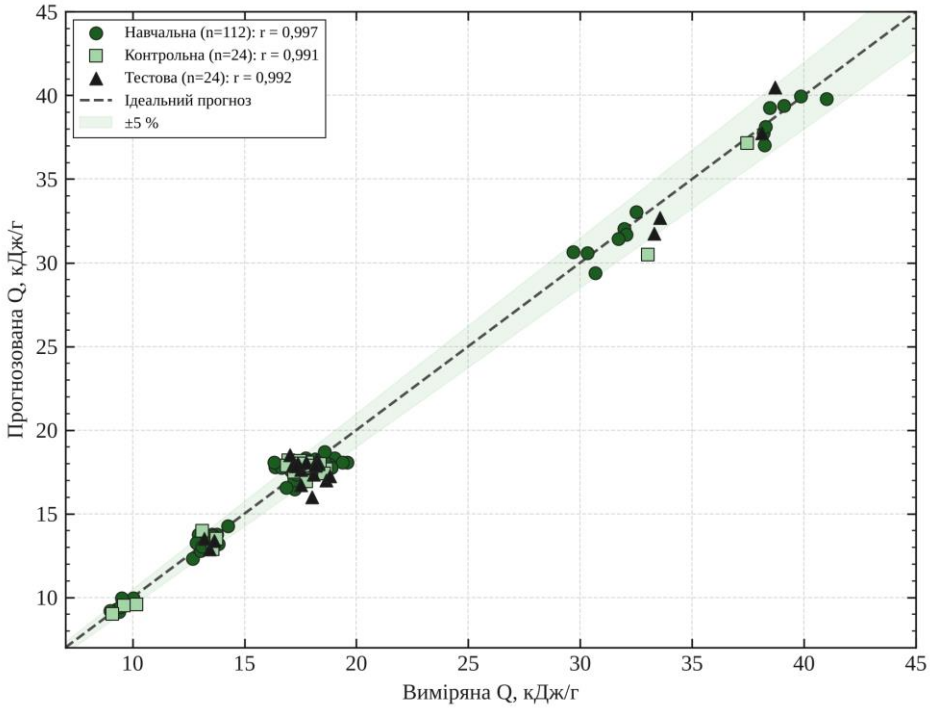


Рис. 1. Прогнозована та виміряна теплота згоряння (MLP 6-36-1)

Порівняння восьми моделей машинного навчання показало, що для відомих видів палива нейромережа, гауссів процес і метод k-найближчих сусідів мають похибку 3–4 %, а для нових компонентів відходів вона сягає 30–60 %. Ускладнення архітектури мережі точності не підвищує. Тому прогноз в ІВС слід поєднувати з контролем меж застосовності за відстанню Махаланобіса і калориметричним донавчанням моделі [5].

Перелік джерел посилань

1. Чупа В. М., Адаменко Я. О. Дослідження рівня зольності та вмісту хімічних елементів в золі різних видів твердих побутових відходів та твердопаливних пелет. Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування. 2023. № 1(27). С. 92–98.
2. JCGM 100:2008. Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM). BIPM, 2008.
3. EN ISO 21640:2021. Solid recovered fuels — Specifications and classes.
4. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Vol. 5: Waste. IPCC, 2006.
5. Liukkonen M., Hälikkä E., Hiltunen T., Hiltunen Y. Dynamic soft sensors for NOx emissions in a circulating fluidized bed boiler. Applied Energy. 2012. Vol. 97. P. 483–490.

УДК 621.311:621.314

УЗГОДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО РЕЗЕРВУ ТА СТРУМОВИХ ОБМЕЖЕНЬ ІНВЕРТОРА ПРИ ПЕРЕХОДІ ЛОКАЛЬНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СИСТЕМИ В ОСТРІВНИЙ РЕЖИМ

Тоберт М. Ю., аспірант; Мороз О. М., д.т.н., професор
Державний біотехнологічний університет,
м. Харків, Україна

Розвиток розподіленої сонячної генерації та установок зберігання енергії (УЗЕ) сприяє підвищенню енергетичної безпеки України [1]. Для локальних електричних систем (ЛЕС) підприємств агропромислового комплексу важливим є збереження живлення критичних споживачів після втрати зовнішньої мережі. Однак достатня енергоємність УЗЕ не гарантує успішного переходу в острівний режим через струмові обмеження інвертора та особливості навантаження.

Мета роботи – обґрунтувати підхід до спільного оцінювання енергетичної достатності УЗЕ та струмових обмежень інвертора під час переходу ЛЕС із СЕС в острівний режим. Розглянуто систему з мережоформувальним інвертором УЗЕ (grid-forming, GFM) та мережевим інвертором СЕС (grid-following, GFL). Після відокремлення від зовнішньої мережі GFM-інвертор забезпечує підтримання напруги та частоти автономної системи [2]. На відміну від автономного пуску, розглянутий перехід передбачає збереження живлення критичних споживачів.

Перехід ЛЕС в острівний режим потребує узгодження процесів із різними часовими масштабами: запас енергії УЗЕ визначає тривалість автономної роботи, а струмові обмеження GFM-інвертора впливають на підтримання напруги під час перехідного процесу [3]. Тому оцінювання лише енергетичної достатності накопичувача є недостатнім.

На першому етапі визначають доступну енергію УЗЕ з урахуванням фактичної ємності, початкового та мінімально допустимого станів заряду й ККД розряджання:

$$E_{\text{дост}} = E_{\text{факт}}(SOC_0 - SOC_{\min})\eta_{\text{розр}} \qquad (1)$$

де $E_{\text{факт}}$ – фактична доступна енергоємність акумулятора; SOC_0 – початковий стан заряду; $SOC_{\min}$ – мінімально допустимий стан заряду; $\eta_{\text{розр}}$ – сумарний ККД розряджання.

Отримане значення порівнюють із прогнозованим дефіцитом енергії критичних споживачів за заданий час автономності. Додатково перевіряють допустиму потужність розряду УЗЕ та можливість обмеження генерації СЕС.

На другому етапі перевіряють перехідний процес з урахуванням обмежувача струму, реактивного навантаження, затримок захисту й автоматики. Для симетричного трифазного режиму необхідне обмеження має вигляд:

$$P^2 + Q^2 \le (\sqrt{3}\, U I_{max})^2 \qquad (2)$$

де P, Q – активна та реактивна потужності інвертора; U – діюча лінійна напруга; I_{max} – допустимий фазний струм. Зниження напруги за незмінного струмового обмеження зменшує доступну потужність інвертора. Умова (2) не є достатнім критерієм динамічної стійкості.

За фактичної енергоємності УЗЕ 100 кВт·год, початкового заряду 80%, мінімально допустимого 20% та ККД розряджання 0,92 доступна енергія становить 55,2 кВт·год, що забезпечує теоретично 1,84 год живлення навантаження 30 кВт. Для інвертора потужністю 40 кВА за номінального струмового обмеження зниження напруги до 0,8 від номінальної зменшує доступну повну потужність до 32 кВА. За реактивної потужності 25 квар допустима активна потужність становить приблизно 20 кВт. Отже, достатній енергетичний резерв не гарантує покриття миттєвого навантаження. Наведені результати отримано для умовних параметрів без динамічного моделювання.

Для подальшої перевірки запропоновано порівняти сценарії втрати мережі за різних рівнів заряду, виробітку СЕС та часток електродвигунного навантаження. Показниками мають бути мінімальна напруга, відхилення частоти, тривалість струмообмеження, час відновлення режиму та недовідпуск енергії критичним споживачам. Межі допустимості слід задавати за вимогами обладнання й налаштуваннями захисту. За недостатнього резерву необхідно узгоджувати розвантаження ЛЕС із запуском резервного джерела. Для перевірки запропонованого підходу доцільно дослідити сценарії втрати зовнішньої мережі за різних станів заряду УЗЕ, потужності СЕС та частки електродвигунного навантаження. Критеріями оцінювання є мінімальна напруга, відхилення частоти, тривалість обмеження струму, час відновлення режиму та недовідпущена енергія критичним споживачам.

Встановлено, що успішний перехід ЛЕС в острівний режим потребує узгодження енергетичного резерву УЗЕ та струмових обмежень інвертора, що формує мережу. Розрахунковий приклад показав, що за достатнього запасу енергії для живлення навантаження 30 кВт зниження напруги до 0,8 від номінальної може обмежити допустиму активну потужність інвертора до 20 кВт. Це обґрунтовує необхідність спільного вибору енергоємності УЗЕ, потужності інвертора та алгоритмів керування навантаженням. Подальші дослідження передбачають динамічне моделювання переходу ЛЕС в острівний режим.

Перелік джерел посилань

1. IEA. Policy options to accelerate distributed solar PV in Ukraine. Paris, 2025. URL: https://surl.li/lvicsf (дата звернення: 24.10.2026).
2. Idaho National Laboratory. Grid-Forming Inverters. GridTechPedia. Оновлено: березень 2026. URL: https://surl.lt/xfcnxl (дата звернення: 24.10.2026).
3. Mohiuddin S., Du W., Lyu X., Kim J., Nguyen Q. H. A Two-Stage Current Limiting Control Strategy for Direct-Droop-Controlled Grid-Forming Inverters. IEEE Transactions on Industry Applications. 2025. Vol. 61, no. 4. P. 6472–6483. DOI: 10.1109/TIA.2025.3544164.

УДК 621.311.243

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ПРИВАТНОГО БУДИНКУ ЗА РАХУНОК ГІБРИДНОЇ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ З НАКОПИЧЕННЯМ ЕНЕРГІЇ

Шван А., студент; Яцун О., канд. фіз.-мат. наук, асистент

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна.

Підвищення енергоефективності приватних будинків робить дедалі актуальнішим використання власної сонячної генерації. Система трифазної гібридної сонячної електростанції потужністю 20 кВт – це комплекс технічного обладнання, призначений для перетворення сонячної енергії на електричну. Її можна застосовувати у будинках, фермах, офісах, майстернях, комерційних приміщеннях та інших місцях, які споживають багато енергії протягом дня.

До складу станції входять фотоелектричні панелі, гібридний інвертор потужністю 20 кВт, монтажна конструкція, захист від постійного та змінного струму, системи моніторингу й управління енергією, а за потреби – акумуляторна батарея. Панелі виробляють постійний струм, який інвертор перетворює на змінний, придатний для живлення побутових електроприладів, і водночас регулює взаємодію системи з навантаженнями та мережею. Залежно від конфігурації надлишок енергії може передаватися в мережу, накопичуватися в акумуляторах або використовуватися для додаткових потреб будинку. Можливість та умови експорту визначаються місцевими правилами.

Важливим компонентом фотоелектричної електростанції потужністю 20 кВт є інвертор. Він перетворює постійний струм сонячної батареї на корисний змінний струм і регулює взаємодію системи з навантаженнями або комунальною мережею. Інвертор номінальною потужністю 20 кВт повинен забезпечувати стабільну роботу за відповідного навантаження та витримувати допустимі короткочасні перевантаження згідно з технічними характеристиками виробника.

Під час проєктування необхідно врахувати добове та сезонне споживання електроенергії, щоб визначити потужність панелей, параметри інвертора й ємність акумуляторів. Важливим є вибір місця встановлення з урахуванням орієнтації, кута нахилу, доступної площі та можливого затінення, що безпосередньо впливає на продуктивність системи [1]. Також слід забезпечити сумісність інвертора з електромережею будинку, резервне електропостачання та автоматичне перемикання між джерелами енергії під час відключень [2].

З рис. 1 бачимо, що пік сонячної генерації припадає на денні години, тоді як споживання часто зростає ввечері. Акумуляторна батарея дає змогу накопичувати надлишок енергії вдень і використовувати його пізніше, збільшуючи частку власного споживання та зменшуючи потребу в електроенергії з мережі [3].

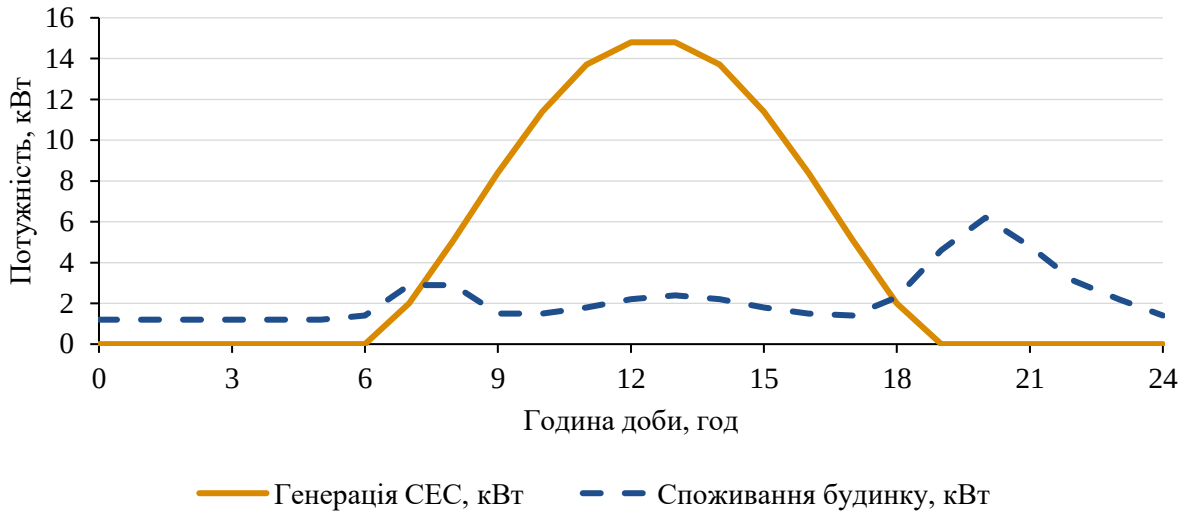


Рис. 1. Добові профілі генерації сонячної електростанції потужністю 20 кВт та споживання електроенергії приватним будинком

Серед переваг впровадження сонячної електростанції можна виділити перетворення сонячного випромінювання на електричну енергію для потреб будинку, що сприяє зменшенню залежності від традиційних джерел електроенергії та скороченню викидів парникових газів. Використання власної сонячної генерації дає змогу зменшити обсяги придбання електроенергії з мережі, а накопичення її надлишку в акумуляторних батареях забезпечує подальше використання в періоди недостатньої сонячної генерації [2]. Крім того, система моніторингу забезпечує контроль виробництва, споживання та накопичення електроенергії, а функції керування інвертора дають змогу оптимізувати її розподіл [3].

Отже, трифазна гібридна сонячна електростанція потужністю 20 кВт є перспективним рішенням для підвищення енергоефективності приватного будинку. Водночас фактичні результати експлуатації залежать від кліматичних умов, характеристик обладнання та налаштувань системи.

Перелік джерел посилань

1. Mehedi I. M., Salam Z., Ramli M. Z. et al. Critical evaluation and review of partial shading mitigation methods for grid-connected PV system using hardware solutions: the module-level and array-level approaches. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2021. Vol. 146. Art. 111138. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111138

2. Wu X., Tang Z., Stroe D.-I., Kerekes T. Overview and Comparative Study of Energy Management Strategies for Residential PV Systems with Battery Storage. Batteries. 2022. Vol. 8, No. 12. Art. 279. DOI: https://doi.org/10.3390/batteries8120279

3. Luthander R., Widén J., Nilsson D., Palm J. Photovoltaic self-consumption in buildings: A review. Applied Energy. 2015. Vol. 142. P. 80–94. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.12.028

УДК 621.316.1

ОПТИМІЗАЦІЯ ПОТОКОРОЗПОДІЛУ ПОТУЖНОСТІ В МІКРОМЕРЕЖІ З РОЗПОДІЛЕНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІ

Олійніченко М. Ю., здобувач третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти, Бялобржеський О. В., к.т.н., доцент,

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, Україна

Сучасні мікромережі, що поєднують відновлювані джерела енергії, силові перетворювачі та нелінійні навантаження, характеризуються складними режимами потокорозподілу активної та реактивної потужності [1]. У мікромережах суттєву роль відіграють параметри ліній електропередачі [2], зокрема їх ємність та провідність, які впливають на втрати потужності між окремими гілками мережі.

Встановлення розподілених джерел електроенергії безпосередньо у вузлах навантаження або поблизу них дозволяє зменшити відстань передавання потужності від центрального джерела живлення до споживачів. У результаті частина активної потужності генерується безпосередньо в місцях її споживання, що призводить до зменшення струмів у відповідних ділянках мережі та, відповідно, зниження втрат активної потужності, зумовлених активним опором ліній.

Крім того, використання розподілених джерел, обладнаних силовими перетворювачами, створює можливість регулювання потоків реактивної потужності. Зміною режиму роботи інверторів фотоелектричних і вітрових установок, а також перетворювача системи накопичення енергії можна забезпечити локальну генерацію або споживання реактивної потужності. Це дозволяє частково компенсувати реактивне навантаження безпосередньо у вузлах її споживання, зменшуючи перетікання реактивної потужності між вузлами та струмове навантаження ліній. Як наслідок, зменшуються втрати активної потужності, пов'язані з передаванням реактивної складової струму, а також покращується режим напруги у вузлах мікромережі.

Розроблено заступну схему мікромережі яка представлена як радіальна розподільча мережа з центром живлення, розташованим у вузлі 0, та окремими фідерними гілками, що живлять споживачів. Для розробки заступної схеми використано відому модель мікромережі птахоферми [3]. Параметри заступної схеми представлені в таблиці 1.

Кожна ділянка лінії електропередачі представлена П-подібною заступною схемою яка включає поздовжні активний *Rij* та реактивний *Xij* опори, а також поперечні провідності *Bij* розташовані по обидва боки ділянки.

Проведено розрахунок основної гармоніки розімкнутої мережі по напрузі, яка задається в кінці мережі. Отримані результати зведено в таблицю 2.

Таблиця 1. Параметри заступної схеми

Ділянка мікромережі	P, кВт	Q, кВАр	l, км	r_0, Ом/км	x_0, Ом/км	b_0 10^{-6} С/км
0-1	120	105,83	0,054	0,6	0,35	114
0-2	0	0	0,0214	1,14	0,345	88
2-3	20	17,63	0,045	1,14	0,345	88
2-4	10	10,2	0,0533	1,14	0,345	88
4-5	5	5,1	0,0627	1,14	0,345	88
0-6	0	0	0,0567	1,14	0,345	88
6-7	20	17,63	0,0333	1,14	0,345	88
6-8	15	9,29	0,052	1,14	0,345	88
8-9	2	1,23	0,057	1,14	0,345	88

Отримані результати створюють передумови для оцінювання ефективності встановлення розподілених джерел електроенергії у вузлах мікромережі. Зокрема, розміщення вітрової турбіни у вузлі 5 дозволить забезпечувати частину навантаження S5 безпосередньо за місцем споживання, зменшуючи потоки активної потужності через ділянки 0–2, 2–4 та 4–5. Аналогічний ефект може бути досягнутий шляхом встановлення сонячної фотоелектричної установки у вузлі 9, що дозволить частково покривати навантаження S9 та зменшувати передавання потужності через ділянки 0–6, 6–8 та 8–9.

Таблиця 2. Зведенні результати розрахунків

Ділянка мікромережі	$\dot{S}$ кВА	$\Delta\dot{U}$, В
0	199.232+j170.559	-
0-1	125.119+j108.869	14.771-j3.01
0-2	35.771+j33.16	2.745-j1.319
2-3	20.226+j17.7	3.255-j1.448
2-4	15.197+j15.357	2.980-j1.658
4-5	5.022+j5.106	1.168-j0.630
0-6	38.336+j28.519	7.656-j2.718
6-7	20.293+j17.678	3.785-j2.359
6-8	17.149+j10.565	3.005-j0.787
8-9	2.002+j1.230	0.387-j0.1

Перелік джерел посилань

1. J. S. Wang, J. Yan, Y. Xu, and K. Huang, “Power flow calculation method for isolated microgrid considering the influence of harmonic power,” J. Eng., vol. 2017, pp. 2615–2621, 2017, doi: 10.1049/joe.2017.0844.

2. B. Li, M. Sun, W. Wen, X. Ji, and F. Xiao, “Research on concentrated frequency-dependent parameter model for short overhead transmission lines based on first-order rational function fitting,” Front. Energy Res., vol. 11, Art. no. 1244329, 2023, doi: 10.3389/fenrg.2023.1244329.

3. M. Oliinychenko, O. Bialobrzheskyi, and A. Postil, “Research on power distribution in a microgrid with distributed electricity sources,” Elektrotekhnika ta Elektroenerhetyka, no. 1, pp. 42–52, 2025, doi: 10.15588/1607-6761-2025-1-5.

УДК 621.311:519.876

ФІЗИЧНІ МОДЕЛІ ПРОГНОЗУВАННЯ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ

Герасименко В. П., к. т. н., доцент; Майбородіна Н. В., к. ф.-м. н., доцент
ВП НУБіП України «Ніжинський агротехнічний інститут», м. Ніжин, Україна

Сучасний розвиток вітрової енергетики потребує вдосконалення методів оцінювання вітрових ресурсів. Особливу увагу дослідники приділяють прогнозуванню виробництва електроенергії. Використання фізичних моделей, які описують закономірності атмосферних процесів та рух повітряних мас, є на сьогодні актуальним методом моделювання виробництва вітрової електроенергії. Фізичне моделювання вітроенергетичних процесів ґрунтується на застосуванні рівнянь гідродинаміки, закону збереження енергії та закону збереження імпульсу. Для дослідження вітрових ресурсів використовують чисельні метеорологічні моделі, які дають змогу визначати розподіл швидкості та напрямку вітру. Використання фізичних моделей враховує характеристики земної поверхні та оцінює вплив вітроелектростанцій на атмосферні процеси.

У роботі [1] розглянуто метеорологічну модель оцінювання фізичних параметризацій впливу вітрових електростанцій. Дослідники проаналізували різноманітні випадки зміни швидкості вітру, турбулентності та будови атмосферного потоку. Результати дослідження продемонстрували важливість урахування взаємодії вітроелектростанцій з атмосферою з метою підвищення достовірності чисельного моделювання.

В роботі [2] описано формування та поширення сліду за вітровими турбінами. Обґрунтовано, що зниження швидкості вітру змінює інтенсивність турбулентності. Порівняння результатів моделювання з метеорологічними вимірюваннями показало можливість відтворення основних характеристик вітрового сліду. Застосування моделі дало змогу враховувати взаємний вплив турбін і повітряного потоку на оцінку потенціалу вітроелектростанцій [2].

Отже, фізичні моделі є важливим інструментом прогнозування енергетичних показників вітроелектростанцій. Водночас прогнозування багаторічної динаміки встановленої потужності вітроелектростанцій потребує окремого підходу, оскільки цей показник визначається не лише природними умовами, а й економічними, технологічними та регуляторними чинниками.

Перелік джерел посилань

1. Fischereit J., Vedel H., Larsén X. G., Theeuwes N. E., Giebel G., Kaas E. Modelling wind farm effects in HARMONIE–AROME (cycle 43.2.2) – Part 1: Implementation and evaluation. *Geoscientific Model Development*. 2024. Vol. 17. P. 2855–2875. DOI: https://doi.org/10.5194/gmd-17-2855-2024.
2. Volker P. J. H., Badger J., Hahmann A. N., Ott S. The Explicit Wake Parametrisation V1.0: a wind farm parametrisation in the mesoscale model WRF. *Geoscientific Model Development*. 2015. Vol. 8. P. 3715–3731. DOI: https://doi.org/10.5194/gmd-8-3715-2015.

УДК 621.311

ВИВЧЕННЯ СИНУСОЇДАЛЬНИХ СИГНАЛІВ В КУРСІ ПІДГОТОВКИ МАЙБУТНІХ ІНЖЕНЕРІВ-ЕНЕРГЕТИКІВ

Матюшенко М.С., студент; Грудинін Б.О., д-р пед. наук, доцент, завкафедри фізики

Навчально-науковий інститут енергетики, автоматики і енергозбереження НУБіП України

У професійній діяльності інженера-енергетика надважливо володіти теоретичними відомостями про синусоїдальний сигнал, що є єдиним змінним сигналом, форма якого не змінюється під впливом характеристик резистивних, індуктивних і ємнісних елементів.

Визначено, що для розуміння суті синусоїдального сигналу існує низка визначень і понять, що можуть застосовуватися до будь-якого змінного сигналу.

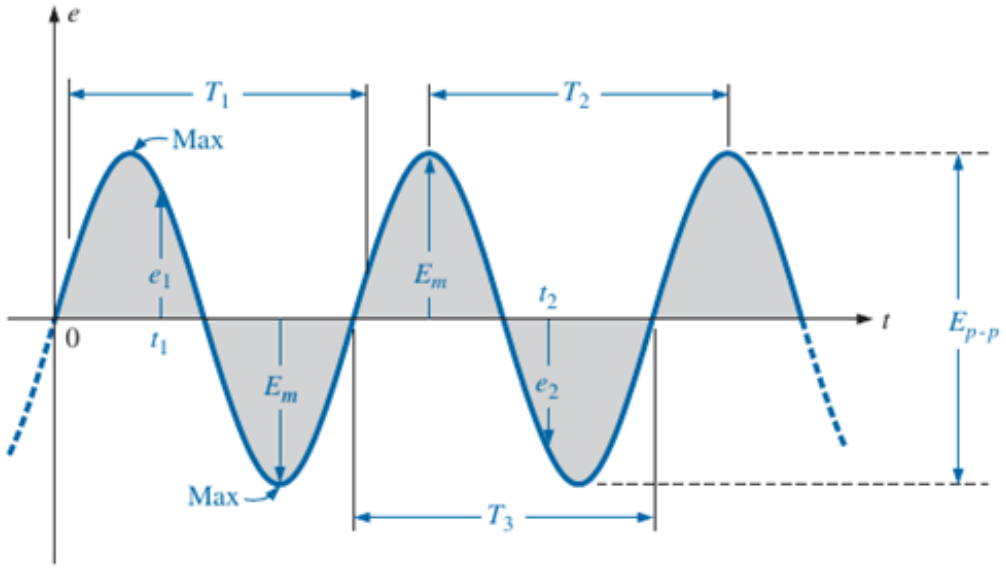


Рис. 1. Синусоїдальний сигнал разом із додатковими позначеннями як модель для визначення основних термінів. Вертикальна вісь графіка може бути проградуйована у вольтах або амперах, а горизонтальна вісь – в одиницях часу.

Так, основними термінами є: 1) миттєве значення – значення сигналу в певний момент часу (миттєві значення позначають малими літерами, наприклад e_1 та e_2); 2) пікова амплітуда – максимальне значення сигналу, відлічене від його середнього значення (позначають великими літерами, наприклад E_m – амплітуда напруги джерела, V_m – амплітуда падіння напруги на навантаженні); 3) пікове значення – максимальне миттєве значення функції, відлічене від нульового рівня напруги (для сигналу із середнім значенням, що дорівнює нулю, пікова амплітуда та пікове значення збігаються); 4) розмах сигналу, або значення «від піка до піка» (повна різниця напруг між позитивним і негативним піками сигналу, тобто сума модулів позитивного та негативного пікових значень (позначають E_{p-p} або V_{p-p}; для симетричного синусоїдального сигналу $E_{x\text{-}x} = 2E_m$)); 5) періодичний сигнал – сигнал, який безперервно повторюється через однакові проміжки часу; 6) період T – проміжок часу, через який періодичний сигнал повністю повторюється; 7) цикл – частина сигналу, що міститься в межах одного періоду; 8) частота f –

кількість повних циклів сигналу, що відбуваються протягом однієї секунди (одиницею вимірювання частоти є Гц).

Отримати синусоїдальний сигнал можна як вертикальну проєкцію радіус-вектора, який рівномірно обертається навколо нерухомої точки. Якщо послідовно наносити значення вертикальної проєкції радіус-вектора над і під нульовою лінією, то після повного повороту вектора на 360° буде утворено один повний період синусоїдального сигналу (рис. 2).

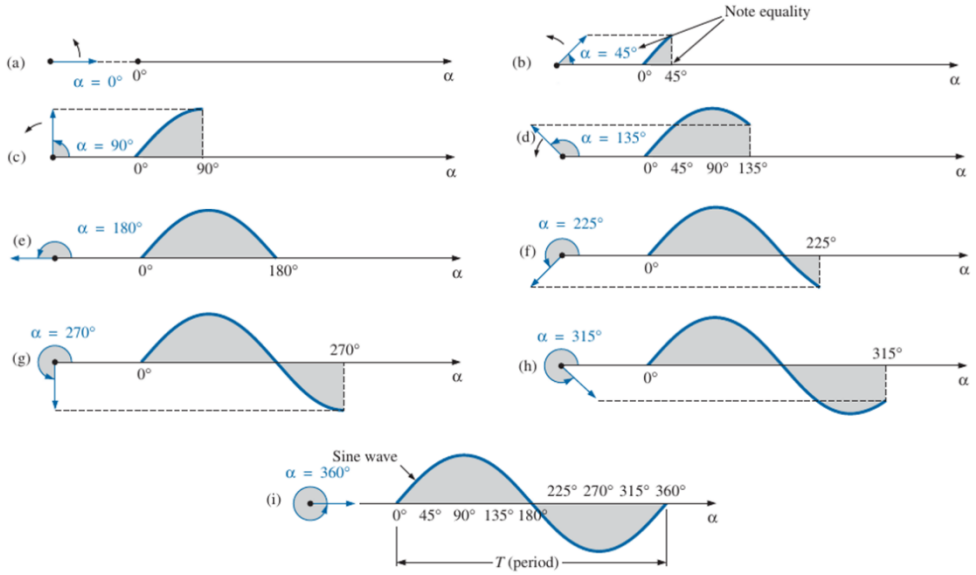


Рис. 2. Генерування синусоїдального сигналу шляхом обертання вертикальної проєкції радіус-вектора

Візуалізувати синусоїдальний сигнал дозволяє о**сцилограф, який** є вимірювальною апаратурою. Основним завданням приладу є представлення сигналів на екрані у вигляді графіків, де по горизонтальній осі відкладається час, а по вертикальній осі – напруга. Відтак, осцилограф дає можливість спостерігати форму сигналу, його амплітуду, частоту, фазу та інші параметри, інтерпретація яких має вирішальне значення для аналізу роботи електричних та електронних систем (рис. 3а).

Так, на рис. 3б показана схема дослідження LC-генератора з мостом Віна на біполярному транзисторі, складником якої є осцилограф.

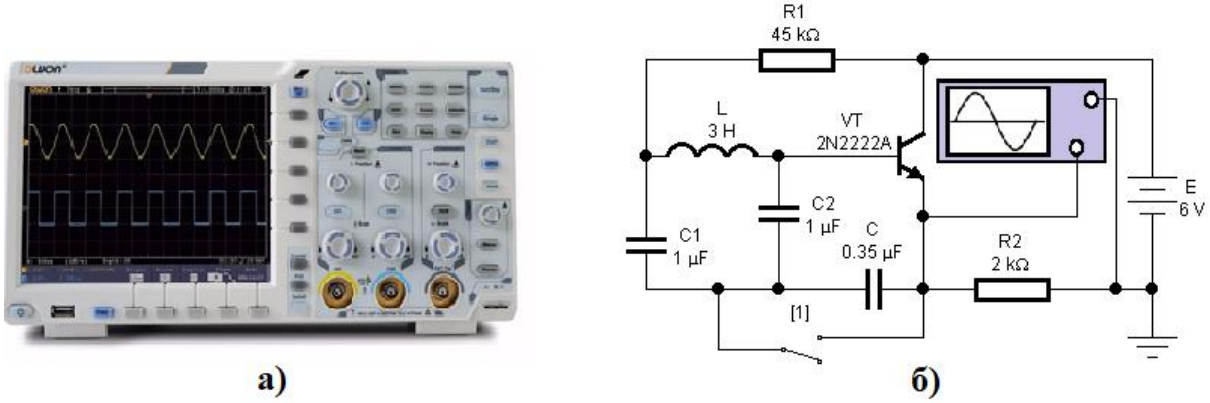


Рис. 3: а) цифровий осцилограф 2-канальний OWON XDS3202A 2 x 200 МГц, пам'ять 40 М, АЦП: 14 біт; б) дослідження LC-генератора з мостом Віна на біполярному транзисторі

Цифровий запам’ятовувальний осцилограф перетворює аналоговий сигнал у цифрову форму за допомогою аналого-цифрового перетворювача. Висока частота дискретизації дає змогу виявляти незначні спотворення форми сигналу.

Перелік джерел посилань

1. Бойко В.В., Відьмаченко А.П., Залоїло І.А., Малюта М.В. Фізика з основами кваліметрії: навчальний посібник. Київ, 2018. 564 с.
2. Посудін Ю. І. Фізика з основами біофізики. Київ, 2003. 400 с.
3. Бойко В. В., Булах Г. І., Відьмаченко А. П., Гуменюк Я. О., Ільїн П. П. Фізика. Київ, 2016. 468.

УДК 621.3.066.5/6:636

ВТРАТИ ЕНЕРГІЇ ПІД ЧАС КОМУТАЦІЇ В ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПУСКАЧАХ

Коробський В.В., к.т.н., доцент; Денисенко В.Ю., студент-магістр; Коробська О.В., студентка

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

Вся електрична енергія W, яка виділяється в комутуючих пристроях при комутації, перетворюється в теплову Q. Частина її (Q_1) витрачається на нагрівання маси металу контакт-деталі нерухомої та рухомої до температури плавлення і частково на плавлення металу на робочій поверхні контакт-деталі; інша частина (Q_2) - на нагрівання маси розплавленного металу до температури кипіння і на випаровування частини металу. Розглядаючи теплові процеси для одного полюсу пускача, можна записати [1, 2]:

$$W = Q = Q_1 + Q_2. \qquad (1)$$

Енергія W має дві складові: одну – прямопропорційну часу горіння дуги і яка обумовлюється активним навантаженням кола - W_R, та другу – постійну - W_L, яка дорівнює енергії магнітного поля, що накопичена в індуктивностях електричного кола і витрачається в комутуючих пристроях при комутації:

$$\mathrm{W_R} = \mathrm{U_0 I_0 t_0} \cdot \frac{1}{6}\left(1 + 2\frac{\mathrm{U_1}}{\mathrm{U_0}}\right) = \mathrm{U_0 I_0 t_0} \cdot \omega_\mathrm{R} = \mathrm{P_{сер}} \cdot \mathrm{t_0}\,, \qquad (2)$$

де U_0 – напруга мережі (джерела живлення), В;

I_0 – струм навантаження, А;

U_1 – спад напруги на опорі контакту кола, В;

$\mathrm{P_{сер}} = \frac{1}{6}\mathrm{U_0 I_0}\left(1 + 2\frac{\mathrm{U_1}}{\mathrm{U_0}}\right)$ – середня потужність в контакт-деталях, яка визначається активною складовою навантаження R_0, Вт; (3)

$\omega_\mathrm{R} = \frac{1}{6}\left(1 + 2\frac{\mathrm{U_1}}{\mathrm{U_0}}\right)$ – коефіцієнт, який показує відношення напруг U_1 і U_0; (4)

$$\mathrm{W_L} = \frac{1}{2}\mathrm{L I_0^2 к} = \frac{1}{2}\mathrm{U_0 I_0 t_0}\frac{\mathrm{к}}{\alpha} = \mathrm{U_0 I_0 t_0}\frac{\mathrm{к}}{2\alpha} = \mathrm{U_0 I_0 t_0} \cdot \omega_\mathrm{L}\,, \qquad (5)$$

де κ=0,6÷0,8 – коефіцієнт, який враховує характер навантаження;

$\omega_L = \frac{\kappa}{2\alpha}$ – коефіцієнт, який залежить від характеру навантаження кола;

t_0 – час горіння електричної дуги на контактах.

Розрахунок проводиться для одного пускача ПМЛ – 1100 на один цикл комутації, дані для розрахунку використовуються з отриманих осцилограм струму і напруги. Величина електричної енергії, яка виділяється в одному контакті пускача:

– для серійного пускача (матеріал СрМ0,2+М1):

$$W_1 = U_0 I_0 t_{01} \cdot \omega_1 = 0{,}065\,\text{кВ} \cdot 10\text{А} \cdot 9{,}44 \cdot 10^{-6}\,\text{год} \cdot 0{,}705 = 4{,}33 \cdot 10^{-6}\,\text{кВт} \cdot \text{год};$$

– для пускача з дослідними контакт-деталями (матеріал 81,3%Cu+10%Cr+2,0%TiB_2+3,0%Nb+2,0%C+0,7%Zr) [3]:

$W_2 = U_0 I_0 t_{02} \cdot \omega_2 = 0{,}065\,\text{кВ} \cdot 10\text{А} \cdot 6{,}44 \cdot 10^{-6}\,\text{год} \cdot 0{,}908 = 4{,}09 \cdot 10^{-6}\,\text{кВт} \cdot \text{год}$. Зниження втрат електричної енергії для трьох полюсів головного кола пускачів з контактами мостикового типу складає:

$$\Delta W = 6 \cdot (W_1 - W_2) = 6 \cdot (4{,}33 - 4{,}09) \cdot 10^{-6} = 1{,}44 \cdot 10^{-6}\,\text{кВт} \cdot \text{год}.$$

Тобто, при використанні пускачів з дослідними матеріалами, економія втрат електроенергії складає майже 6%.

Перелік джерел посилань

1. Nauryz T.A. (2024). Mathematical modeling of the thermal process of arc erosion with current carrying heating effect in a temperature gradient. Partial Differential Equations in Applied Mathematics, 11, 100888.

2. Biyik S., Aydin M. (2026). Effect of TiO_2 Content on the Arc-Erosion Resistance of Ag/SnO_2 Electrical Contact Materials Prepared via Mechanical Alloying-Assisted Powder Metallurgy. Journal of Electronic Materials, 55, 3850–3867.

3. Korobskyi V.V. New aspects of creation of environmentally friendly composite materials for contact systems of electric equipment in the agriculture sector: 2018. 11 th International Conference "Electronic Processes in Organic and Inorganic Materials" (ICEPOM-11) / V.V.Korobskyi, A.M.Mrachkovskyi // Molecular Crystals and Liquid Crystals. – Ivano–Frankivsk (Ukraine), May 21-25, 2018, – P. 35.

УДК 621.315.2:620.179

ІСНУЮЧІ МЕТОДИ ДІАГНОСТИКИ СИЛОВИХ КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЙ НАПРУГОЮ 10 кВ

Коробський В.В., к.т.н., доцент; Скороход О.С., студент-магістр; Коробська О.В., студентка

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

Силові кабельні лінії напругою 10 кВ є важливим елементом систем електропостачання промислових підприємств, населених пунктів та об'єктів інфраструктури. Надійність їх роботи значною мірою залежить від технічного стану ізоляції, якості монтажу кабельних муфт і кінцевих закладень, а також умов

експлуатації. У процесі тривалої роботи кабелів під впливом електричних, теплових, механічних і кліматичних факторів відбувається старіння ізоляції, виникають локальні дефекти, які можуть призвести до пробою та аварійного відключення лінії.

Для своєчасного виявлення несправностей застосовують різні методи діагностики, які відрізняються принципом дії, точністю та інформативністю.

Одним із найпоширеніших методів є *вимірювання опору ізоляції* за допомогою мегаомметра. Метод передбачає визначення електричного опору між струмопровідними жилами, а також між жилами та металевим екраном кабелю. Зниження опору може свідчити про зволоження, забруднення або погіршення властивостей ізоляційного матеріалу. Основними перевагами методу є простота виконання, доступність обладнання та невисока вартість вимірювань. Водночас він має обмежену чутливість до локальних дефектів, які перебувають на початковій стадії розвитку.

Іншим методом є *випробування підвищеною напругою*, яке застосовується для перевірки електричної міцності ізоляції. Під час випробування до кабелю прикладають регламентовану випробувальну напругу протягом установленого часу. Для кабелів із полімерною ізоляцією, зокрема зі зшитого поліетилену (XLPE), можуть використовуватися випробування змінною напругою наднизької частоти (VLF). Перевагою методу є можливість виявлення дефектів, що становлять загрозу електричній міцності кабелю. Недоліком є додаткове електричне навантаження на ізоляцію та обмежені можливості визначення місця розташування дефекту.

Важливе значення для оцінювання стану кабельної ізоляції має *метод вимірювання тангенса кута діелектричних втрат (tg δ).* Він ґрунтується на визначенні діелектричних втрат в ізоляційному матеріалі під дією змінної напруги. Збільшення значення tg δ може свідчити про старіння, зволоження або погіршення діелектричних властивостей ізоляції. Метод дозволяє оцінити загальний стан ізоляційної системи та виявити тенденції її деградації. Основним обмеженням є те, що результати вимірювання характеризують переважно інтегральний стан ізоляції та не завжди дають змогу локалізувати окремі дефекти.

Одним із найбільш інформативних сучасних методів є *діагностика часткових розрядів.* Часткові розряди виникають у локальних ділянках ізоляції внаслідок наявності повітряних порожнин, неоднорідностей матеріалу, мікротріщин або дефектів кабельних муфт. Їх реєстрація дозволяє виявляти пошкодження на ранніх стадіях розвитку та оцінювати активність дефектних ділянок.

Для визначення місця пошкодження кабельної лінії широко застосовується *рефлектометричний метод.* Його принцип полягає у подачі електромагнітного імпульсу в кабель та реєстрації відбитого сигналу від місць зміни хвильового опору. За часом проходження імпульсу визначають відстань до пошкодження або неоднорідності. Перевагою методу є можливість оперативного визначення місця обриву жили, короткого замикання та інших пошкоджень. Водночас він має

обмежену чутливість до дефектів ізоляції, які ще не спричинили помітної зміни хвильового опору.

Додатково для контролю технічного стану кабельного обладнання використовується *тепловізійна діагностика*. Вона дозволяє виявляти локальні перегріви контактних з'єднань, кабельних муфт і місць приєднання кабелів. Метод є безконтактним і дає можливість проводити контроль без виведення обладнання з роботи за умови дотримання вимог електробезпеки. Проте тепловізійне обстеження не забезпечує безпосереднього контролю прихованої ізоляції по всій довжині кабельної лінії.

Таким чином, кожен із розглянутих методів має певні діагностичні можливості та обмеження. Вимірювання опору ізоляції забезпечує первинний контроль, випробування підвищеною напругою дозволяє оцінити її електричну міцність, метод tg δ характеризує діелектричні властивості, а реєстрація часткових розрядів дає змогу виявляти локальні дефекти. Рефлектометрія використовується переважно для визначення місця пошкодження кабелю.

Перелік джерел посилань

1. IEC 60270:2025. High-voltage test techniques – Charge-based measurement of partial discharges. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2025.
2. IEC 60502-2:2014+AMD1:2024. Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1 kV up to 30 kV. Part 2: Cables for rated voltages from 6 kV up to 30 kV. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2024.

УДК 621.311:519.876

КРИТЕРІЇ ПРОГНОЗУВАННЯ РОЗВИТКУ ВІТРОВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

Майбородіна Н. В., к. ф.-м. н., доцент; Герасименко В. П., к. т. н., доцент
ВП НУБіП України «Ніжинський агротехнічний інститут», м. Ніжин, Україна

Сучасний розвиток вітрової енергетики в світі потребує вдосконалення методів прогнозування енергетичних показників. У сучасній науковій літературі велика увага приділяється прогнозуванню виробництва електроенергії вітровими електростанціями. Також дослідники оцінюють вітрові ресурси і прагнуть отримати довгострокові показники розвитку галузі. Точність одержуваних прогнозів має важливе значення для планування режимів роботи енергосистем та забезпечення необхідних резервів потужності. Саме від цих прогнозних показників залежить прийняття інвестиційних та управлінських рішень.

За часовим критерієм в наукових дослідженнях розрізняють короткострокові, середньострокові та довгострокові прогнози. Авторами дослідження [1] проаналізовані короткострокові прогнози, які охоплюють період від кількох годин до доби. Такі прогнози застосовуються для балансування навантаження. Середньострокові прогнози (кілька діб або тиждень) досліджено в роботі [2]. Їх використовують під час планування режимів роботи енергосистеми. Довгострокове прогнозування охоплює періоди від місяця до року [3]. Ці прогнози використовують для оцінюванню перспектив галузі та плануванню технічного обслуговування.

Таким чином, огляд наукових публікацій показав, що вибір методу прогнозування залежить від поставленого завдання, часового горизонту, наявності вихідних даних і вимог до точності результатів. Вибір моделі визначається часовим критерієм, доступністю інформації, складністю досліджуваного процесу та необхідною точністю. Важливим напрямом досліджень є вдосконалення підходів до оцінювання потенціалу вітрової енергетики з урахуванням сучасних тенденцій розвитку галузі. Отримані результати можуть бути використані для визначення перспектив упровадження вітроенергетичних технологій і планування подальшого розвитку відновлюваної енергетики.

Перелік джерел посилань

1. Arslan, T. E., Ş. Şağlam, and B. Oral. 2024. “A Review of Short-Term Wind Power Generation Forecasting Methods in Recent Technological Trends.” *Energy Reports* 12: 197–209. doi:10.1016/j.egyr.2024.06.006.
2. Arrassi, I., S. Arkhouch, I. El Myasse, F. Dib, K. Ben Meziane, and N. Benaya. 2026. “A Comprehensive Review of AI-Based Wind Power Forecasting over Multiple Time Horizons.” *Process Integration and Optimization for Sustainability*: 1–23. doi:10.1007/s41660-026-00730-z.
3. Manzano, E., R. Nogales, and A. Rios. 2025. “A Systematic Review of Wind Energy Forecasting Models Based on Deep Neural Networks.” *Wind* 5 (4): 29. doi:10.3390/wind5040029.

УДК 620.92

ОСОБЛИВОСТІ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ З ВИСОКОЮ ЧАСТКОЮ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

Гуменна М. О. студентка, Гребенюк Т.В., к.т.н., доцент
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
м. Київ, Україна

Сучасний розвиток електроенергетики характеризується зростанням частки відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), поширенням розподіленої генерації, систем накопичення енергії та силових електронних перетворювачів. Інтеграція сонячної, вітрової, малої гідро-, біо- та інших видів відновлюваної енергетики змінює структуру електроенергетичних систем (ЕЕС) і характер процесів, що визначають їх стійкість та надійність [1, 2].

Для забезпечення надійного функціонування ЕЕС важливими є статична та динамічна стійкість. Статична стійкість характеризує здатність системи зберігати або відновлювати усталений режим при малих збуреннях. При значних аварійних впливах аналізують динамічну стійкість та умови збереження синхронної роботи генераторів. У разі втрати синхронізму можуть виникати асинхронні режими, що потребують дії систем протиаварійної автоматики.

Особливістю ВДЕ є залежність процесів генерації від характеристик первинного енергетичного ресурсу. У фотоелектричних системах сонячне випромінювання безпосередньо перетворюється на електричну енергію внаслідок внутрішнього фотоефекту. Для підвищення ефективності

використовуються алгоритми відстеження точки максимальної потужності MPPT. У вітроенергетичних установках кінетична енергія повітряного потоку перетворюється спочатку на механічну, а потім на електричну енергію за допомогою генераторів різних типів. Гідроенергетика ґрунтується на використанні гідродинамічних процесів, а біо- та геотермальна енергетика – переважно теплових і термодинамічних процесів [1, 2].

Значну роль у приєднанні ВДЕ до електричних мереж відіграють силові електронні перетворювачі. DC/DC-конвертери забезпечують узгодження рівнів постійної напруги, а DC/AC-інвертори – перетворення постійного струму в змінний із параметрами, необхідними для роботи в мережі. Використання широтно-імпульсної модуляції та систем синхронізації дозволяє забезпечувати необхідні параметри напруги і частоти. Особливості побудови мереж постійного та змінного струму з альтернативними джерелами енергії, а також принципи використання перетворювальної техніки розглядаються у роботі [4].

Одним із основних викликів при зростанні частки ВДЕ є стохастичний характер генерації сонячних та вітрових установок. Невідповідність між поточною генерацією та споживанням призводить до необхідності постійного балансування режимів енергосистеми. Особливої актуальності це набуває для систем із розосередженою генерацією, де одночасно функціонує велика кількість локальних джерел і споживачів. Процеси енергообміну при балансуванні режимів таких систем потребують координованого управління генерацією, накопиченням та споживанням електроенергії [3].

Важливим засобом підвищення гнучкості ЕЕС є системи накопичення електричної енергії, зокрема батарейні системи BESS. Вони дозволяють компенсувати короткочасні небаланси активної потужності, згладжувати піки генерації ВДЕ, підтримувати параметри мережі та підвищувати ефективність використання розподіленої генерації. Перспективним напрямом також є воднева енергетика, у якій надлишкова електрична енергія може використовуватися для виробництва водню з подальшим його застосуванням як енергоносія [1, 2].

Зростання частки інверторно-приєднаних джерел змінює динамічні властивості енергосистеми. При витісненні традиційних синхронних генераторів зменшується еквівалентна інерційність ЕЕС, унаслідок чого при виникненні небалансу потужності частота може змінюватися швидше. Крім того, використання силових електронних перетворювачів може впливати на якість електроенергії через появу вищих гармонік та інших електромагнітних спотворень. Тому актуальним є використання швидкодіючих систем автоматичного керування, накопичувачів енергії та сучасних алгоритмів керування перетворювачами.

Для комплексного вирішення зазначених завдань застосовуються концепції Smart Grid, Microgrid та Virtual Power Plant. Інтелектуальні мережі забезпечують моніторинг та автоматизоване управління потоками енергії, мікромережі дозволяють локально балансувати генерацію і споживання, а віртуальні електростанції об’єднують розподілені джерела, накопичувачі та керованих споживачів у єдиний координований комплекс [2, 3].

Отже, інтеграція ВДЕ істотно змінює характер динамічних процесів у сучасних електроенергетичних системах. Поряд із традиційними засобами забезпечення стійкості дедалі більшого значення набувають силова електроніка, системи накопичення енергії, цифрове керування та інтелектуальні мережі.

Перелік джерел посилань

1. Альтернативні джерела енергії та технології їх використання : підручник / В. В. Клименко та ін. Кропивницький : Ексклюзив-Систем, 2023. 268 с.
2. Відновлювані джерела енергії : монографія / за заг. ред. С. О. Кудрі ; ІВЕ НАНУ. Київ : ІВЕ НАНУ, 2020. 392 с.
3. Денисюк С. П., Лисий В. В. Аналіз процесів енергообміну при балансуванні режимів систем енергозабезпечення з розосередженою генерацією. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2023. № 3. С. 7–22.
4. Мережі постійного і змінного струму з альтернативними джерелами енергії – 1 : навч. посібник / уклад.: Є. В. Вербицький, Л. М. Батрак. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 140 с.

UDC 621.3.066.5/6:620.178

INVESTIGATION OF THE PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES AND ELECTRO-EROSION WEAR RESISTANCE OF RESTORED CONTACTS FOR ELECTROMAGNETIC STARTERS

Reshetiuk V.M.[1], PhD, Associate Professor; Korobskyy V.V.[2], PhD, Associate Professor; Vasiuk V.V.[3], PhD, Associate Professor

[1]Warsaw University of Life Sciences (SGGW), Warsaw, Poland

[2, 3]National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Ensuring the reliable operation of electrical switching devices depends largely on the technical condition of their contact systems. During the operation of electromagnetic starters, contact surfaces undergo intensive electroerosion wear, which is accompanied by the destruction of the working layer, changes in geometric parameters, and the degradation of the electrical characteristics of the contact connection. Restoring worn contact components using gas-plasma spraying is a promising approach for extending the service life of electrical devices. At the same time, the effectiveness of the restoration process is determined by the coating's structure, porosity, hardness, bond strength to the substrate, and resistance to electro-erosion processes [1]. Experimental studies were conducted on the contact components of the PML-1200.O4 electromagnetic starter. Composite powder materials based on copper and silver, produced via powder metallurgy techniques, were used to restore the working surfaces [2]. Specifically, a copper-based composition (85% Cu + 10% Mo + 2% MoO_3 + 1% C + 2% Ni) and a silver-based material (94,5% Ag + 2,0% Co_2O_3 + 2,0% C + 1,5% Y_2O_3) were investigated. For comparison, traditional contact materials—namely M1 copper, L62 brass, A99 aluminum, and the silver-cadmium alloy SOK-15—were also tested.

Gas-plasma spraying was performed under conditions that ensured the substrate temperature did not exceed 100°C. This approach minimized the risk of thermal deformation of the contact holders. The quality of the restored contacts was evaluated

by analyzing the hardness, density, porosity, strength, and fatigue resistance of the coatings.

The experimental results demonstrated that the mechanical properties of the sprayed materials depend on their chemical composition and the technological parameters of the deposition process. For the silver-based composite coating, the initial hardness was 95 HB, increasing to 105 HB after 300,000 switching cycles. For the copper-based composition, the hardness increased from 85 to 92 HB. This indicates a change in the structure of the working layer during operational loading, as well as the stabilization of its mechanical characteristics.

An important indicator of the quality of gas-plasma-sprayed coatings is their density, which characterizes the degree of compaction of the sprayed material. It was found that the density of the experimental silver-containing composition increased from 8,25 to 9,02 g/cm³ after 300,000 switching cycles. For the copper-based composite material, this value remained practically stable, at approximately 8,64–8,66 g/cm³. These observed changes are attributed to the specific structural rearrangement of the coating under the influence of repeated switching operations.

An analysis of porosity revealed that its magnitude significantly affects the mechanical strength, thermal conductivity, and electrical conductivity of the contact layer. For the copper-based composite coating, the total porosity was approximately 19,7%, with an open porosity of 9,8%. The presence of pores, oxide inclusions, and surface irregularities can lead to local stress concentrations and initiate the formation of microcracks. Therefore, the optimization of spraying parameters should focus on increasing the density of the structure and enhancing the bond strength between the coating and the substrate.

Particular attention was paid to the fatigue strength of the "base metal–coating" system. It was determined that cyclic mechanical and switching loads can induce residual stresses and microcracks within the surface layers. Their further development depends on the material structure, layer thickness, porosity, and adhesive strength. Optimizing the composition of the composite material and the application process parameters makes it possible to reduce the rate of degradation and increase the durability of the restored contacts.

Experimental testing has confirmed that the restored contacts remain functional for at least 300,000 switching cycles. The use of copper- and silver-based composite materials enables the creation of wear-resistant contact coatings and reduces the need for traditional silver-cadmium materials. Thus, gas-plasma restoration is a technologically and economically promising method for enhancing the operational reliability of electrical switching devices.

References

1. Pratiwi I., Ardy H., Prawara B., Ramdan R.D., Muttaqien F. Synthesis of NiCrAlY nano-scale powder by high-energy ball milling process for thermal spray coating application. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies,* 2024, 3(12(129)):56–61. DOI: 10.15587/1729-4061.2024.307040.

2. Guzmán D., González F., Muranda D., Aguilar C., et al. Fabrication and Arc Erosion Behavior of Ag–SnO_2–ZnO Electrical Contact Materials. *Materials,* 2023, 16(10):3618. DOI: 10.3390/ma16103618.

УДК 620.92

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ MICROGRID З УРАХУВАННЯМ ЕКОНОМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ

Білоус Н.М. аспірант, Сорокін Д.С. к.т.н., доцент

Національний університет біоресурсів і природокористування України

м. Київ, Україна

Актуальність дослідження. Розвиток розосередженої генерації та систем накопичення електроенергії створює передумови для підвищення ефективності локальних електроенергетичних систем. Водночас економічна доцільність їх експлуатації залежить не лише від обсягів власної генерації, а й від узгодження графіків виробництва, споживання та заряджання акумуляторів. Тому актуальним є застосування методів оптимізації режимів MicroGrid з урахуванням часової диференціації тарифів на електроенергію.

Особливістю MicroGrid із відновлюваними джерелами енергії є невідповідність у часі між виробництвом електроенергії та її споживанням. Застосування акумуляторних систем дає змогу накопичувати надлишкову генерацію та використовувати її в періоди підвищеного навантаження або високої вартості електроенергії. Водночас ефективність такого підходу залежить від вибору режимів заряджання та розряджання накопичувача.

Мета дослідження — оцінити можливості зниження витрат на електропостачання шляхом оптимізації режимів роботи MicroGrid із фотоелектричною генерацією та акумуляторною системою.

Основні матеріали досліджень. Для дослідження розглянуто модельну мережеву MicroGrid, до складу якої входять фотоелектрична установка потужністю 10 кВт, акумуляторна система ємністю 20 кВт·год із максимальною потужністю заряджання та розряджання 10 кВт, а також локальне навантаження. Погодинний профіль генерації сформовано за даними PVGIS за червень 2025 року, а профіль споживання є модельним із сумарним місячним обсягом 4320 кВт·год.

Оптимізацію режиму виконано методом змішаного цілочисельного лінійного програмування (MILP). Критерієм оптимізації обрано мінімізацію витрат на придбання електроенергії із зовнішньої мережі:

$$minC = \sum_{t=1}^{T} c_t P_{grid,t} \Delta t$$

де C – сумарні витрати на електроенергію; c_t – тариф у відповідному часовому інтервалі; $P_{grid,t}$ – потужність відбору електроенергії з мережі; Δt – тривалість розрахункового інтервалу; T – кількість інтервалів моделювання.

Під час моделювання враховано обмеження рівня заряду акумулятора (SoC) у межах 10–90 %, початковий і кінцевий рівні заряду 50 %, а також ККД заряджання та розряджання 95 %. Передбачено використання електроенергії для покриття локального навантаження без її експорту до зовнішньої мережі.

Результати порівняння базового та оптимізованого режимів наведено в таблиці.

Показник	Базовий режим	Оптимізований режим
Відбір електроенергії з мережі, кВт·год	3031,76	2929,29
Вартість електроенергії, грн	13 828,56	11 482,81

Отримані результати демонструють, що економічний ефект оптимізації визначається не лише скороченням обсягу споживання електроенергії із зовнішньої мережі, а й раціональним вибором часу її придбання. Це підтверджує доцільність урахування тарифної диференціації під час формування графіків роботи акумуляторної системи.

За результатами моделювання оптимізація забезпечила зменшення відбору електроенергії із зовнішньої мережі на 102,47 кВт·год (3,38 %), а витрат на електропостачання — на 2345,75 грн (16,96 %). Отриманий ефект зумовлений узгодженням роботи акумуляторної системи з графіками генерації, споживання та тарифними періодами.

Для забезпечення відтворюваності отриманих результатів важливо конкретизувати вихідні параметри моделі, зокрема тарифні ставки та алгоритм формування базового режиму. Це дасть змогу незалежно перевірити економічні розрахунки та об'єктивність порівняння досліджуваних режимів.

Отримані результати свідчать, що врахування тарифної диференціації під час планування роботи акумуляторної системи дає змогу підвищити економічну ефективність MicroGrid без збільшення встановленої потужності генерувального обладнання. Запропонований підхід може бути використаний як основа для розроблення систем енергетичного менеджменту, орієнтованих на зменшення витрат на електропостачання.

Висновок. Моделювання підтвердило доцільність застосування MILP для оптимізації режимів MicroGrid із фотоелектричною генерацією та акумуляторною системою. За прийнятих умов оптимізований режим дозволив зменшити витрати на придбання електроенергії на 16,96 %. Подальші дослідження доцільно спрямувати на перевірку ефективності запропонованого підходу за різних профілів навантаження та тарифних умов.

Перелік джерел посилань

1. Дерев’янко Д., Перегуда О. Особливості побудови систем Smart-моніторингу MicroGrid систем. *Енергетика: економіка, технології, екологія.* 2024. № 1. С. 57–64. DOI: https://doi.org/10.20535/1813-5420.1.2024.298816.
2. Богойко І. І. Технології та методи оптимізації багаторівневих систем акумулювання електроенергії. *Енергетика: економіка, технології, екологія.* 2025. № 2. С. 147–154. DOI: https://doi.org/10.20535/1813-5420.2.2025.328564.
3. Thirunavukkarasu G. S., Seyedmahmoudian M., Jamei E., Horan B., Mekhilef S., Stojcevski A. Role of optimization techniques in microgrid energy management systems – A review. *Energy Strategy Reviews*. 2022. Vol. 43. Article 100899. DOI: https://doi.org/10.1016/j.esr.2022.100899.
4. European Commission, Joint Research Centre. Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS). URL: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/ (дата звернення: 20.09.2026).

УДК 621.316.727:621.355

УЗГОДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РОБОТИ КОНДЕНСАТОРНОЇ УСТАНОВКИ ТП 10/0,4 КВ ІЗ ГІБРИДНОЮ СИСТЕМОЮ ЗБЕРІГАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Петренко А.В., к.т.н., доцент; Забіяка Д.О., аспірант

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

Впровадження установок зберігання електроенергії (УЗЕ) на промислових підприємствах обумовлене потребою в резервуванні електроживлення, балансування пікових навантажень та акумулювання згенерованої електроенергії відновлюваних джерел [1]. На трансформаторних підстанціях (ТП), обладнаних ступеневими конденсаторними установками (КУ), здійснюється регулювання перемикань компенсаційної ємності за *cos φ* на вводі. Під'єднання УЗЕ до шин 0,4 кВ змінює потік активної потужності через ввід, тому режим КУ залежить від параметрів заряджання-розряджання акумуляторів та режиму роботи реактивної потужності інвертора [2].

Дослідження проведено для ТП 10/04 кВ промислового підприємства із сухим трансформатором 1000 кВА та встановленою КУ потужністю 210 квар із конденсаторами 1×10 квар і 8×25 квар. Згідно з добовим графіком на вводі *cos φ* змінювався у межах 0,90..0,99 при цільовому діапазоні 0,97..1,0.

Для розрахунків прийнято SUNGROW ST255CS-2H з акумуляторами 257 кВт·год та потужністю інвертора 125 кВт, що працює з *cos φ* = 1 і підтримує мережевий та автономний режими з автоматичним перемиканням [3]. Активна потужність змінювалася в межах 53..297 кВт із середньозваженим *cos φ* = 0,985, проте 24 % часу *cos φ* зафіксовано нижчим за 0,97.

Вимірювання коефіцієнту потужності *cos φ* на вводі 0,4 кВ за від'єднаної УЗЕ від електромережі (рис. 1), вважається базовим режимом, містить короткочасні провали до 0,901, що свідчить про недостатню компенсацію через можливу не достачу вільних ступенів КУ.

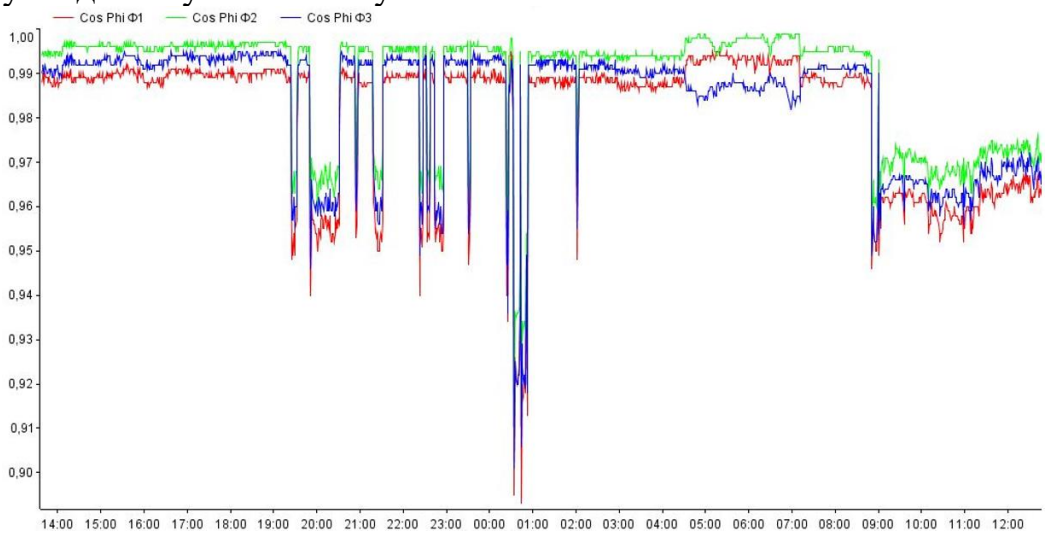


Рисунок 1 – Графічна залежність коефіцієнту потужності *cos φ* на вводі 0,4 кВ

Лінійна напруга в цей час змінювалася у межах 392..412 В, тобто не виходила за межі ± 5 %.

Врахування режиму роботи УЗЕ показує, що розрядження акумулятора потужністю 125 кВт знижує середній *cos φ* з 0,964 до 0,881, а дефіцит реактивної потужності зростає з 18,4 до 43,8 квар, тобто на $P_{\text{УЗЕ}} \cdot tg\varphi = 25{,}4$ квар.

Ступінь $Q_{\text{ст}}$ можна ввімкнути без виходу за діапазон *cos φ* = 0,97..1,0 за $P_{B\text{від}} \geq \frac{Q_{\text{ст}}}{tg_{\varphi max}}$, тобто $P_{B\text{від}} \geq 99{,}8$ кВт для ступеня 25 квар і 39,9 кВт для 10 квар. Під час аналізу визначено, що умова недотримується 1,7 % часу, а за цілодобового розряду 125 кВт – 77 %. Тому регулювання КУ доцільно налаштовувати за $\Delta Q = Q_{B\text{від}} - P_{B\text{від}} \cdot tg\varphi$, а не за *cos φ*.

Розрахунок частотної характеристики вузла з урахуванням LCL-фільтра інвертора показав, що за нерозстроєної КУ паралельний резонанс зміщується з 38-ї до 8,3-ї гармоніки, фільтр інвертора знижує його порядок ще на 1..20 %, а за низького навантаження опір вузла зростає на 11-й гармоніці в 9,6 рази (110 квар) і на 7-й – у 3,5 рази (210 квар) при виміряних рівнях 11-ї та 23-ї гармонік напруги 1,4 і 1,1 % [4]. Дроселі з $p = 7$ % ($f_p = 189$ Гц) утримують резонанс на $h = 3{,}5..3{,}8$ незалежно від УЗЕ і знижують опір вузла на 5..13-й гармоніках до 0,69..0,98 опору трансформатора, з номінальною напругою конденсаторів – не менше 440 В [5]. Резонанс фільтра інвертора з трансформатором розстроювання не усуває.

Узгодження забезпечує система енергоменеджменту EMS УЗЕ, шляхом передавання на регулятор КУ команди зміни режиму для випереджувального перемикання $n = \frac{P_{\text{УЗЕ}} tg\varphi}{Q_{\text{ст}}}$ ступенів, обмежує розряджання умовою $P_{B\text{від}} \geq \frac{Q_{\text{ст}}}{tg_{\varphi max}}$, обмежує ступені за напругою в нічний час, забороняє експорт у мережу та блокує КУ в автономному режимі УЗЕ.

Отже, без УЗЕ конденсаторна установка не утримує цільового *cos φ*, а УЗЕ з *cos φ* = 1 підвищує необхідну потужність компенсації на 25,4 квар, тому детальний аналіз процесу узгодження уставок регулювання КУ, розстроювання ступенів та алгоритм EMS досліджувався з використанням результатів моделювання в MATLAB Simulink.

Перелік джерел посилань

1. Петренко А.В., Забіяка Д.О. Технічні та системні аспекти інтеграції накопичувачів електроенергії в промислові електромережі. Матеріали III міжнародної науково-практичної конференції «Цифрові технології в енергетиці і автоматиці». Київ, 2025.
2. IEEE Std 1547-2018. IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces. IEEE, 2018.
3. Sungrow. ST255CS-2H C&I energy storage system: datasheet. Version 2. 2025.
4. EN 50160:2022. Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks.
5. IEC 61642:1997. Industrial a.c. networks affected by harmonics – Application of filtres and shunt capacitors.

УДК 620.91

ОПТИМІЗАЦІЯ РОБОТИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ, ЩО ПРАЦЮЄ НА ЩЕПІ

Доповідач слухач аспірантури ННІ ЕАЕ Чайка В.В. Науковий керівник – к.т.н., доц., Радько І.П

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна.

В умовах зростання потреби в енергетичній незалежності та розвитку відновлюваних джерел енергії особливого значення набуває використання біомаси для виробництва електричної та теплової енергії. Одним із перспективних видів місцевого біопалива є деревна щепа, яку отримують у процесі перероблення деревини та відходів деревообробного виробництва. Ефективність електричних станцій, що використовують таке паливо, значною мірою залежить від його вологості, однорідності, організації процесу спалювання та узгодженості роботи основного й допоміжного обладнання. Тому оптимізація режимів функціонування таких установок є важливим завданням для підвищення енергоефективності та зниження експлуатаційних витрат.

Одним із головних чинників ефективної роботи станції є якість палива. Підвищена вологість деревної щепи зумовлює збільшення витрат енергії на випаровування вологи, що знижує ефективність процесу перетворення енергії. Тому доцільно контролювати вологість, фракційний склад і стабільність подавання палива, а за необхідності передбачати його попереднє підсушування.

Важливим напрямом оптимізації є вдосконалення процесу спалювання біомаси. Регулювання подавання первинного та вторинного повітря відповідно до навантаження дає змогу підтримувати необхідні умови горіння, зменшувати втрати теплоти з димовими газами та обмежувати утворення шкідливих викидів. Для цього доцільно застосовувати автоматизовані системи керування, які враховують температуру в зоні горіння, вміст кисню в димових газах і поточну потужність установки.

Додатковий потенціал підвищення енергоефективності полягає в оптимізації роботи допоміжних механізмів, зокрема паливоподавачів, димососів, вентиляторів і насосів. Використання частотного регулювання електроприводів дає змогу узгоджувати продуктивність обладнання з фактичними потребами станції та зменшувати власне електроспоживання. Важливим заходом також є утилізація теплоти відхідних газів, якщо це технічно та економічно доцільно.

Для оцінювання результативності запропонованих заходів необхідно контролювати питому витрату деревної щепи на одиницю виробленої електроенергії, коефіцієнт корисної дії установки, власне споживання електроенергії, стабільність вихідної потужності й екологічні показники. Комплексний аналіз цих параметрів створює основу для визначення оптимальних режимів роботи станції та обґрунтування модернізації її обладнання.

Таким чином оптимізація роботи електричної станції на деревній щепі передбачає комплексне вдосконалення систем паливоподачі, спалювання,

автоматизованого керування та використання теплоти. Реалізація таких заходів сприятиме раціональнішому використанню біомаси, підвищенню енергоефективності, зменшенню власних енергетичних потреб і поліпшенню екологічних характеристик станції.

Перелік джерел посилань

1. Гелетуха Г. Г., Желєзна Т. А., Матвєєв Ю. Б. та ін. Виробництво енергії з біомаси в Україні: технології, розвиток, перспективи. Київ : Академперіодика, 2022. 373 с. URL: https://uabio.org/news/uabio-news/14088/ .
2. Авілов С. В. Високоманеврена теплова електростанція потужністю 50 МВт на біопаливі : магістерська дисертація. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. URL: https://ela.kpi.ua/items/bde9dfa5-74bd-4c9f-8d8d-1e89e8fa3bce .
3. Голуб Г. А., Кухарець С. М., Марус О. А. та ін. Біоенергетичні системи в аграрному виробництві : навчальний посібник / за ред. Г. А. Голуба. Київ : НУБіП України, 2017. 229 с. URL: https://ir.polissiauniver.edu.ua/handle/123456789/7904 .
4. Padinger R., Aigenbauer S., Schmidl C. Best Practice Report on Decentralized Biomass Fired CHP Plants and Status of Biomass Fired Small- and Micro-Scale CHP Technologies. IEA Bioenergy Task 32, 2019. URL: https://task32.ieabioenergy.com/publications/best-practise-report-on-decentralized-biomass-fired-chp-plants-and-status-of-biomass-fired-small-and-micro-scale-chp-technologies/ .
5. International Renewable Energy Agency (IRENA). Solid Biomass Supply for Heat and Power: Technology Brief. 2019. URL: https://www.fao.org/wood-energy-info-portal/search/detail/en/c/1599153/ .
6. Obernberger I., Hammerschmid A., Forstinger M. Techno-Economic Evaluation of Selected Decentralised CHP Applications Based on Biomass Combustion with Steam Turbine and ORC Processes. IEA Bioenergy Task 32, 2015. URL: https://task32.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/sites/24/2016/03/TEA_CHP_2015.pdf .

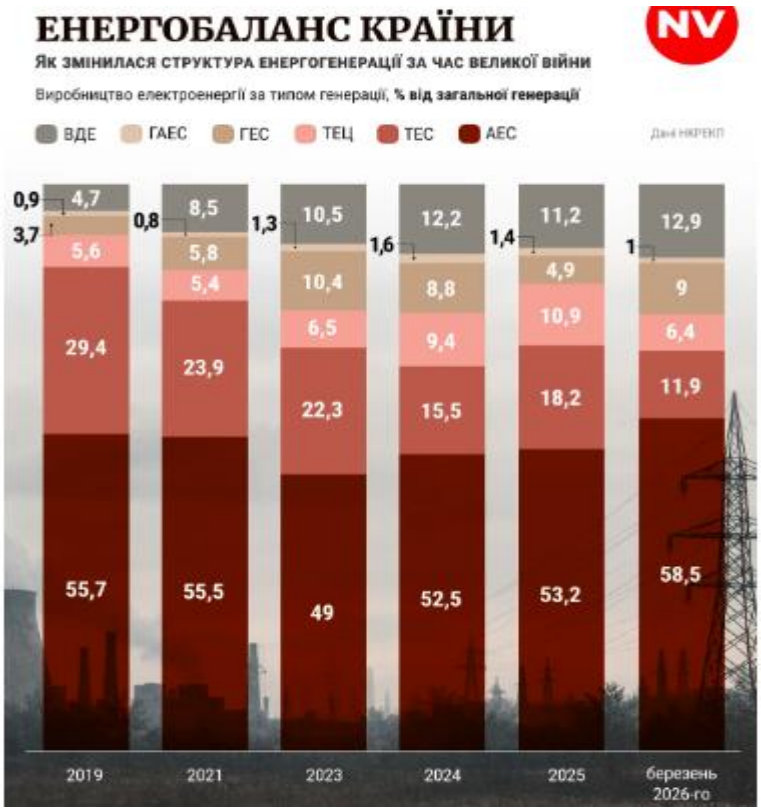
УДК 621.311

ОПТИМІЗАЦІЯ ГІБРИДНОЇ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ ІЗ СИСТЕМОЮ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ЕНЕРГОНЕЗАЛЕЖНОСТІ ПРИВАТНОГО ДОМОГОСПОДАРСТВА

Швець Олег, студент, Яцун Остап, канд. Фіз.-мат. наук, асистент
Національний університет біоресурсів і природокористування України

Сучасний стан енергетичного сектору України, який зазнав безпрецедентних руйнувань внаслідок повномасштабної війни, вимагає кардинального перегляду підходів до енергопостачання приватного сектору. Глибокий дефіцит генеруючих та маневрових потужностей в об'єднаній енергосистемі, тривалі системні блеклаути, загрози нових ударів по критичній інфраструктурі, а також стрімке вимушене зростання тарифів ставлять під загрозу базову життєдіяльність приватних домогосподарств. У цих екстремальних умовах перехід від пасивного споживання до локальної відновлюваної генерації є не просто глобальним екологічним трендом, а єдиним способом фізичного виживання та забезпечення цивільної безпеки.

Як зазначається у дослідженні аналітиків видання NV Бізнес [1], нищівні удари по традиційній теплогенерації стали жорстким каталізатором для прориву України на абсолютно новий технологічний рівень децентралізованої та відновлювальної енергетики. За таких обставин гібридні сонячні електростанції



(ГСЕС) із системами накопичення енергії (СНЕ) виступають головним інструментом гарантування локальної енергетичної стійкості. Проте фінансова спроможність населення в умовах війни обмежена, а капітальна вартість обладнання Зображення 1. Стан енергетики України в динаміці. [1].

залишається високою, що зумовлює гостру потребу в розробці нових науково обґрунтованих методів оптимізації для мінімізації інвестиційних витрат при забезпеченні максимальної автономності об'єкта.

Мета дослідження полягає в розробці комплексної методики оптимізації параметрів гібридної СЕС (потужності фотоелектричного масиву та місткості системи накопичення) для забезпечення максимального рівня енергонезалежності приватного домогосподарства при мінімальних сумарних витратах за життєвий цикл системи.

Для математичного моделювання та оптимізації параметрів ГСЕС було побудовано добовий профіль споживання об'єкта на основі нормативного методу коефіцієнтів попиту згідно з **ДБН В.2.5-23:2010**. Базове домогосподарство класифіковано як приватний будинок із загальним середньомісячним споживанням 400 кВт·год (середньодобове — 13,3 кВт·год) із вираженими двома піками навантаження.

На підставі розрахункових коефіцієнтів ДБН, вечірній максимум споживання (18:00–22:00) визначено на рівні 3,2 кВт, тоді як денний базовий мінімум становить 0,4 кВт. Отриманий теоретичний графік навантаження відображає ключову проблему інтеграції відновлюваних джерел в Україні: повну розсинхронізацію між годинами максимального споживання (ранок, вечір) та годинами пікової генерації фотоелектричного масиву (11:00–15:00). Це обґрунтовує необхідність оптимізації місткості систем накопичення енергії для акумулювання денного надлишку енергії та її перенаправлення на покриття вечірнього дефіциту в умовах воєнних обмежень мережі [2, 3].



Оптимізаційне завдання можна сформулювати як задачу нелінійного програмування, де цільовою функцією є мінімізація загальної вартості володіння системою (ЗВВ) протягом 10 років:

ЗВВ = КВ + ОВ – Д □ min

де:

- ЗВВ — загальна вартість володіння системою протягом розрахункового життєвого циклу (10 років);
- КВ — початкові капітальні витрати на закупівлю та монтаж обладнання (гібридний інвертор, панелі, літій-залізо-фосфатний ($LiFePO_4$) акумулятор, система кріплень);
- ОВ (OPEX) — операційні витрати на технічне обслуговування фотоелектричної станції;
- Д — дохід, отриманий від реалізації надлишків згенерованої електроенергії в мережу за зеленим тарифом.

При цьому в систему рівнянь вводяться обмеження на глибину розряду акумулятора (ГР 90%) для запобігання його передчасній деградації.

Основними змінними проєктування виступають встановлена потужність масиву сонячних панелей ($P_{СП}$, (кВт) та номінальна місткість акумуляторної батареї ($E_{АКБ}$, кВт·год).

Алгоритм інтелектуального керування (EMS). Традиційні алгоритми керування ГСЕС працюють за реактивним принципом (заряд переважає, коли є надлишок сонця; розряд — коли генерації недостатньо). У даній роботі запропоновано проактивний алгоритм Energy Management System (EMS), який інтегрує короткострокові прогнози погоди (через API метеослужб) та враховує наявність багатотарифного обліку електроенергії (нічний тариф). Якщо алгоритм прогнозує хмарну погоду на наступний день, система ініціює примусовий заряд від централізованої мережі в нічні години за мінімальним тарифом. Це дозволяє покрити ранковий пік споживання без залучення дорогої «денної» енергії з мережі, підвищуючи загальну економічну ефективність системи на 14–18% порівняно з базовими налаштуваннями інвертора.

Результати моделювання та економічна оцінка. Розрахунки проводилися для географічних умов центрального регіону України. Результати оптимізації показали, що для домогосподарства із середнім добовим споживанням 13.3 кВт·год оптимальним є встановлення фотоелектричного масиву потужністю 6-8 кВт та системи накопичення місткістю 10-12 кВт·год. Таке співвідношення дозволяє досягти рівня власного споживання (Self-Consumption) на рівні 75-80% та забезпечити повну автономність критичних споживачів (холодильник, системи

опалення, зв'язок, освітлення) під час тривалих аварійних відключень до 24-36 годин. З урахуванням поточних капітальних інвестицій та неминучого прогнозованого зростання тарифів на електроенергію, впровадження оптимізованої системи за механізмом Net Billing (чистого вимірювання) демонструє термін окупності в межах 6.5–8 років, що робить проект інвестиційно привабливим для приватного сектора.

Висновки.

1. Доведено, що ізольоване збільшення потужності сонячних панелей або місткості акумуляторів без врахування реального профілю навантаження призводить до перевитрат та збільшення терміну окупності проекту.

2. Розроблено та протестовано модель проактивного керування EMS, що використовує метеопрогнози та гнучкі тарифи мережі, мінімізуючи витрати на купівлю зовнішньої електроенергії.

3. Визначено оптимальні параметри ГСЕС для типового українського приватного будинку, що гарантує високий рівень енергетичної стійкості (енергонезалежності) за оптимальних капіталовкладень.

Перелік джерел посилань

1. Пасховер, О. (2026). Енергетичне перевтілення. Попри обстріли ворога і зруйновану економіку Україна модернізує енергетику — що саме вже зроблено. *NV Бізнес*. https://nv.uahttps://biz.nv.ua/ukr/economics/vidnovlyuvalna-energetika-ukrajini-yak-zelena-generaciya-strimko-rozvivayetsya-pid-chas-viyni-50650174.html

2. ДБН В.2.5-23:2010. Інженерне обладнання будинків і споруд. Проектування електрообладнання об'єктів цивільного призначення / Мінрегіонбуд України. — Київ : ДП «Укрархбудінформ», 2010. — 112 с. — (Державні будівельні норми України).

3. Моніторинг ринку електроенергії: аналітичний звіт / НКРЕКП, Dixi Group. — Електронні дані. — Energy Map, 2025. — URL: https://dixigroup.org (дата звернення: 25.10.2026).

СЕКЦІЯ 3
ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА

УДК 697.34:352

УПРАВЛІННЯ СТІЙКІСТЮ ЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ГРОМАДИ ПІД ЧАС ЗНЕСТРУМЛЕНЬ

Нижниченко О. С., здобувач другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальність D4 «Публічне управління та адміністрування», Нижниченко Я. Є., канд. екон. наук, доцент, доцент кафедри економіки підприємства та організації підприємницької діяльності

Одеський національний економічний університет, м. Одеса, Україна

Під час знеструмлення котельні потрібне резервне живлення для насосів і автоматики. Швидкість перемикання на резерв впливає на час відновлення подачі тепла. На початку опалювального сезону 30 жовтня 2026 р. в Україні працювали 6 716 котелень, тепло отримували 9 716 об’єктів соціальної сфери [1]. Готовність цих систем до відключень потребує окремої перевірки.

За даними урядового штабу, станом на 12 серпня 2026 р. для об’єктів тепло- та водопостачання забезпечили 918,5 МВт резервної потужності з 1 214,6 МВт заявленої потреби (75,6 %). Міністр Микола Калашник серед складових готовності назвав «резервне живлення, альтернативні джерела тепла, аварійні запаси обладнання» [2]. 2 квітня 2026 р. Кабінет Міністрів повідомив про спрямування 307,7 млн грн на встановлення й підключення 75 уже наявних когенераційних установок [3].

У листопаді 2024 р. ПРООН повідомила про передачу Одесі газопоршневої когенераційної установки в межах проєкту розподіленої генерації [4]. Когенерація забезпечує одночасне виробництво тепла й електроенергії. Для живлення котельні під час відключення мережі режим автономної роботи установки слід передбачити в проєкті й підтвердити випробуванням.

Мета роботи полягає в розробленні порядку оцінювання готовності теплопостачання громади до знеструмлень. Використано аналіз офіційних документів [1–5] і сценарний розрахунок для умовної котельні. Стаття 13 Закону України «Про теплопостачання» визначає повноваження органів місцевого самоврядування у цій сфері [5]. У запропонованому порядку громада визначає пріоритетні котельні та фінансує підготовку резервного живлення. Комунальне підприємство визначає критичне навантаження, випробовує перемикання та реєструє відключення. На обласному рівні запропоновано координувати спільні навчання й взаємодопомогу громад.

Пріоритетність котелень пропонується визначати за наслідками їх зупинки з урахуванням кількості споживачів, наявності підключених лікарень і доступності іншого джерела тепла. Оцінювання наслідків відмови спирається на наукові підходи до визначення критичних компонентів теплових мереж [6].

Готовність оцінюють за трьома показниками. Частка успішних випробувань – це відсоток пріоритетних котелень громади, які успішно пройшли випробування. Успішним є перемикання, після якого резервне джерело живить

насоси й автоматику за визначеного навантаження протягом заданого часу. Розрахункову автономність генератора визначають діленням придатного до використання запасу пального на годинну витрату за відповідного навантаження. Час відновлення теплопостачання відлічують від знеструмлення до моменту, коли температура і витрата теплоносія в контрольній точці мережі повернулися до визначених робочих діапазонів.

В умовному прикладі за запасу 300 л пального витрата 25 л/год дає 12 год роботи, а витрата 30 л/год – 10 год. Для умовної цілі у 24 год потрібні відповідно 600 і 720 л. Зростання годинної витрати на 5 л збільшує добову потребу на 120 л. За того самого запасу граничний час для поповнення пального скорочується з 12 до 10 год.

Результатом роботи є порядок, що пов’язує дані випробувань із рішеннями громади про запас пального, видатки та черговість модернізації котелень. Сценарний розрахунок показує вплив годинної витрати на потребу в пальному. Для застосування порядку підприємство має підтвердити витрату пального й параметри теплоносія під час випробувань і зафіксувати їх у протоколі.

Перелік джерел посилань

1. Мінрозвитку. В Україні розпочинається опалювальний сезон: запущено понад 6,7 тисяч котелень. 30.10.2026. URL: https://mininfra.gov.ua/news/v-ukraini-rozpochynaietsia-opaliuvalnyi-sezon-zapushcheno-ponad-67-tysiachi-kotelen.
2. Урядовий портал. Підготовка до опалювального сезону: регіони мають посилити резервне живлення та аварійну готовність. 18.08.2026. URL: https://www.kmu.gov.ua/news/pidhotovka-do-opaliuvalnoho-sezonu-rehiony-maiut-posylyty-rezervne-zhyvlennia-ta-avariinu-hotovnist.
3. Урядовий портал. Громади підключать 100 МВт когенераційних установок за кошти держбюджету. 02.04.2026. URL: https://www.kmu.gov.ua/news/hromady-pidkliuchat-100-mvt-koheneratsiinykh-ustanovok-za-koshty-derzhbiudzhetu.
4. UNDP Ukraine. Gas-piston cogeneration units delivered to Odesa by UNDP to cover 45% of city’s energy needs for water, heating, and sewage services. 06.11.2024. URL: https://www.undp.org/ukraine/press-releases/gas-piston-cogeneration-units-delivered-odesa-undp-cover-45-citys-energy-needs-water-heating-and-sewage-services.
5. Про теплопостачання : Закон України від 02.06.2005 № 2633-IV. Ст. 13. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2633-15.
6. Mao D., Xu S., Wang J., Shen L., He W. Ensuring reliable district heating systems: Identifying critical components under independent and cascading failure scenarios. Sustainable Cities and Society. 2026. Vol. 137. Article 107118. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scs.2026.107118.

УДК 621.365.5:621.316

ВПЛИВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ НА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ІНДУКЦІЙНОЇ ТИГЕЛЬНОЇ ПЕЧІ З ТИРИСТОРНИМ ПЕРЕТВОРЮВАЧЕМ ЧАСТОТИ

Усенко С. М., к.т.н., доцент; Зозуля В.О. аспірант

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна.

Індукційні тигельні печі з тиристорними перетворювачами частоти належать до найбільших споживачів електроенергії ливарних виробництв і

водночас до найчутливіших до параметрів живлення: резонансний навантажувальний контур з конденсаторною батареєю передає мережеві збурення безпосередньо в технологічний процес. Для промислових вузлів 0,4 кВ в Україні зовнішні відхилення напруги залишаються тривалим чинником, зумовленим пошкодженнями генерувальних і мережевих об’єктів та пріоритетами відновлення енергосистеми [2].

Об’єктом дослідження обрано плавильний пост з піччю ІСТ-0,16 і перетворювачем ТПЧ-250 ТОВ «Львівський завод автонавантажувачів». Показники якості електроенергії вимірювано аналізатором класу А за IEC 61000-4-30 [4], відповідність оцінювано за ДСТУ EN 50160:2023 [1]. Масив даних охопив понад 9400 інтервальних вимірювань, понад 3400 плавок і 700 подій надійності.

У вузлі живлення стабільно виконуються лише вимоги до частоти (50,000 ± 0,037 Гц). Частка інтервалів з коефіцієнтом несиметрії напруг до 2 % у лютому становила 38,9–40,7 % за вимоги 95 %, за 31 добу зареєстровано 44 провали напруги тривалістю 0,28–2,95 с. Сумарний коефіцієнт гармонічних складових напруги лінійно зростає з потужністю печі (THD_U = 4,003 + 0,01797P) і перевищує 8 % за P > 222 кВт; середньозважений cos φ дорівнює 0,829. Звичайна ступінчаста УКРМ потужністю 50–125 квар створює паралельні резонанси на 9,2–14,6 гармоніках, які перекривають 11-ту і 13-ту характеристичні гармоніки перетворювача.

Множинна регресійна модель (R^2 = 0,983; перехресна перевірка 0,982) показала, що кожен відсотковий пункт модуля відхилення напруги збільшує питому витрату електроенергії на 5,07 Вт·год/кг, а сумарного коефіцієнта гармонік – на 4,90 Вт·год/кг; вплив несиметрії в 7 разів слабший. Факторний експеримент підтвердив причинний характер зв’язку (частковий η^2 = 0,419 для класу режиму живлення проти 0,230 для рівня потужності). Порушення якості живлення є первинною причиною 35,5 % простою обладнання (404 з 1138 год на рік).

Енергетичний баланс плавки засвідчив, що корисна теплота становить лише 34,27 % підведеної енергії, а 58,11 % розсіюється в індукторі й тиглі, що узгоджується з висновками щодо визначальної ролі геометрії та завантаження тигля в електричному ККД печі [5]. Порівняння ефектів окремих заходів наведено в табл. 1.

Таблиця 1 - Ефекти заходів з підвищення енергоефективності плавильного поста

Захід	**Зміна показника**
Нормалізація якості живлення ($\lvert\delta U\rvert \le 2$ %, $THD_U \le 5$ %, $K_{2U} \le 2$ %)	питома витрата –1,99 %
Компенсація реактивної потужності до cos φ = 0,95	навантажувальні втрати в трансформаторі –23 %
Фільтрокомпенсація 100 квар (p = 7 %, настроювання 189 Гц)	THD_U 3,71 % проти 13,91 % для звичайної батареї
Завантаження тигля не менше 0,9 номінальної маси	питома витрата –5,26 %, кількість плавок –5,07 %
Скорочення енергії технологічних пауз на 40 %	питома витрата –4 %

Дані табл. 1 свідчать, що для печі з тиристорним перетворювачем компенсацію реактивної потужності допустимо виконувати лише у

фільтрокомпенсаційному виконанні з розстроєними реакторами, яке зміщує паралельний резонанс з 10,32-ї на 3,56-ту гармоніку; за несинусоїдних умов саме неактивні складові повної потужності визначають додаткові втрати [3]. Організаційні заходи разом у 4,5 раза перевищують потенціал нормалізації якості живлення, тому їх доцільно впроваджувати першочергово, а контроль результатів будувати на регресійній базовій лінії енергоспоживання [6] і контрольній карті експоненційно зваженого ковзного середнього, яка виявляє зменшення питомої витрати на 5 % у середньому через 24–25 змін.

Отже, якість електроживлення впливає на індукційну тигельну піч переважно через надійнісний і технологічний канали, тоді як прямий енергетичний ефект її нормалізації не перевищує 2 %. Обґрунтування заходів для плавильних постів має поєднувати енергетичну, технологічну та надійнісну оцінки.

Перелік джерел посилань

1. ДСТУ EN 50160:2023 (EN 50160:2022, IDT). Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності. Чинний від 2025-03-01. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2024. 42 с. URL: https://ukrmts.com/docsdb/51333.html (дата звернення: 31.10.2026).
2. Кириленко О. В., Жаркін А. Ф., Півняк Г. Г., Блінов І. В. Науково-технічні пріоритети розвитку та відновлення електроенергетичних систем в Україні. Технічна електродинаміка. 2026. № 5. С. 56–65. DOI: 10.15407/techned2026.05.056.
3. Федів Є. І., Сівакова О. М. Декомпозиція повної потужності в електричних мережах за несинусоїдальних умов. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2025. № 6. С. 83–88. DOI: 10.31649/1997-9266-2025-183-6-83-88.
4. IEC 61000-4-30:2025. Electromagnetic compatibility (EMC). Part 4-30: Testing and measurement techniques. Power quality measurement methods. Ed. 4.0. Geneva : IEC, 2025. URL: https://webstore.iec.ch/en/publication/71611 (дата звернення: 31.10.2026).
5. Smagór A., Przyłucki R. Analysis of the influence of selected parameters of a cold crucible induction furnace on its electrical efficiency. Energies. 2026. Vol. 19, no. 16. Art. 3813. DOI: 10.3390/en19163813.
6. Stawowy A., Wrona R., Sawczuk M. Bootstrapping regression support tool for energy management in induction melting processes: a multi-plant case study. Archives of Foundry Engineering. 2026. DOI: 10.24425/afe.2026.158018.

УДК 536.2

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОМАСООБМІННИХ ПРОЦЕСІВ В КАНАЛАХ РОТОРНО-ПУЛЬСАЦІЙНОГО АПАРАТУ ДЛЯ ПРИГОТУВАННЯ РІДКИХ КОРМІВ

Сердюк А.М., Ph.D.
Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

При годівлі свійських тварин в більшості випадків застосовується технологія приготування сухих подрібнених кормів. Для молодняку ВРХ, свиней, овець, кіз сухі корми не є оптимальними з точки зору засвоєння поживних речовин та підвищення продуктивності тваринницьких господарств. Ефективнішим рішенням є використання рідких кормових сумішей.

Використання роторно-пульсаційних технологій дозволяє поєднати в одному апараті одразу три основні процеси приготування рідких водозернових кормів: подрібнення зернового компоненту, інтенсивне перемішування його з водою та підігрівання, що особливо актуально в зимовий період року [1].

Проведено чисельне моделювання тепломасообмінних процесів при приготуванні рідких зернових кормів в роторно-пульсаційному апараті (РПА). В РПА тверді компоненти суміші подрібнюються в системі робочих органів «ротор-статор», які мають прямокутні та круглі отвори для проходження водозернового корму. Завдяки високій швидкості обертання ротора під дією відцентрових сил відбувається подрібнення зернового компоненту, а також нагрівання суміші внаслідок дисипації механічної енергії обертання ротора в теплову [2]. На основі чисельних розрахунків тепломасообмінних процесів у системі «ротор-статор», виконаних за допомогою програмного пакету ANSYS FLUENT [3], отримано розподіл температур кормової суміші при варіюванні динамічних та геометричних параметрів досліджуваного об'єкта (рис. 1).

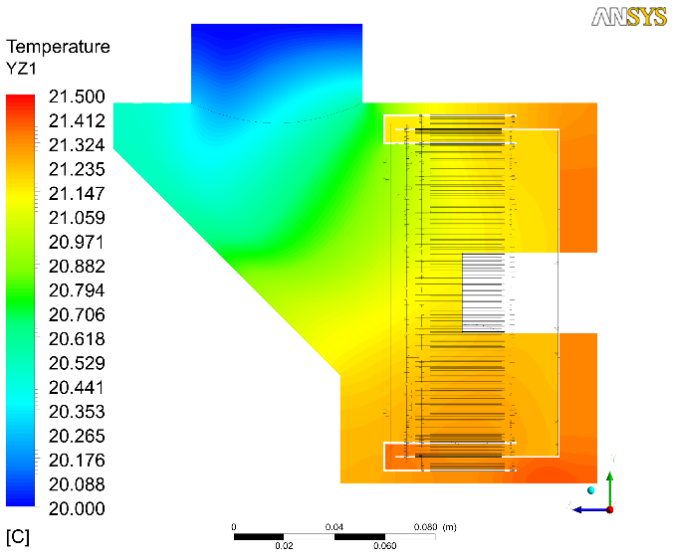


Рис. 1. Розподіл температур в об'ємі робочої камери РПА

На рис. 1 показано, що максимальне підвищення температури оброблюваного середовища відбувається в зазорі між робочими органами установки. За один цикл обробки кормової суміші його температура підвищується приблизно на 1,5 °С. Отже, водозернова суміш, пройшовши 20-25 циклів обробки в РПА, підігріється додатково на 30-37,5 °С, що зменшує енерговитрати на його приготування за рахунок того, що відпадає потреба у застосуванні обладнання для додаткового підігріву. Встановлено, що термічні характеристики кормової суміші найбільше залежать від частоти обертання ротора [4], величини зазору між ротором і статором, а також від геометричних розмірів отворів на робочих органах.

Перелік джерел посилань

1. Gorobets V.G., Serdyuk A.M. Rotor-pulsating apparatus for the preparation of liquid feeds on the grain basis. *Energy and automation*. 2018. Vol. 6. P. 51-57. https://doi.org/10.31548/energiya2018.06.051

2. Горобець В. Г., Ободович О. М., Троханяк В. І., Сердюк А. М. Роторно-пульсаційні апарати для приготування рідких зернових кормів. *Енергетика і автоматика*. 2020. №5, С. 15-31. https://doi.org/10.31548/energiya2020.05.015
3. ANSYS FLUENT Theory Guide. Release 14. ANSYS, Inc. Southpointe 275 Technology Drive Canonsburg, PA 15317, 2011.
4. Сердюк А.М. Режими роботи роторно-пульсаційного апарата для приготування рідких кормів з використанням частотного перетворювача. *Системні дослідження в енергетиці*, 2026. №3 (87), с. 36-45. https://doi.org/10.15407/srenergy2026.03.036

УДК 621.314.26

ДОЦІЛЬНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ЧАСТОТНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА В РОТОРНО-ПУЛЬСАЦІЙНОМУ АПАРАТІ ДЛЯ ПРИГОТУВАННЯ РІДКИХ КОРМІВ

Сердюк А.М., Ph.D.
Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

Використання частотного перетворювача в роторно-пульсаційному апараті (РПА) для приготування рідких кормів в першу чергу обумовлене його здатністю змінювати частоту напруги живлення електродвигуна з метою зменшення споживаної потужності на приготування кормової продукції. Економія електричної енергії відбувається з декількох причин. По-перше, за рахунок того, що коефіцієнт потужності зростає до найбільшого значення, тобто максимум потужності використовується на виконання корисної роботи, а мінімум – йде на втрати в підшипниках, нагрівання тощо. По-друге, високий коефіцієнт потужності зберігається на всіх режимах роботи двигуна РПА [1]. Без використання частотного перетворювача асинхронні двигуни при малому навантаженні мають коефіцієнт потужності в межах 0,3-0,4 [2]. По-третє, немає необхідності у використанні додаткового механічного регулювання (шиберах, заслінках, вентилях тощо), все це виконується електронним шляхом.

В процесі приготування кормової суміші навантаження на двигун РПА є нерівномірним. На початкових етапах обробки споживана потужність установки сягає пікових значень за рахунок інтенсивного подрібнення частинок зерна в робочій камері. Проте з часом споживана потужність зменшується до певного значення і стає постійною. Це пояснюється тим, що вся кормова суміш знаходиться в дисперсному стані, і на її подрібнення витрачається мінімальна кількість енергії. Енергія, в основному, витрачається на процес перекачування сировини з бункера до робочої камери через систему трубопроводів. В даному випадку доцільним є зниження швидкості обертання ротора РПА до менших значень, що дасть змогу зменшити витрати енергії на приготування корму.

Окрім вищезгаданого, частотний перетворювач також виконує захисні функції. В програмному середовищі Matlab досліджено пускові характеристики асинхронного двигуна РПА при використанні частотного перетворювача. Встановлено, що використання останнього дозволяє виконувати плавний пуск двигуна установки, суттєво обмежуючи величину пускового струму і тим самим

запобігаючи передчасному зносу механічної частини установки (муфт, підшипників, валу тощо) [3].

Досліджено режими роботи РПА з частотним керуванням. Визначено оптимальний двоетапний режим роботи РПА: використання номінальної частоти 50 Гц на початковому етапі інтенсивного подрібнення з наступним зниженням до 40 Гц на етапі доведення суміші до готовності. При даному алгоритмі роботи витрати електричної енергії на приготування одиниці кормової продукції зменшуються на 6,75 % за рахунок використання частотного керування. В результаті отримано високоякісний рідкий корм із необхідним середньоповерхневим розміром частинок зернового компонента (300 мкм) та температурою 50°С [4].

Перелік джерел посилань

1. Сердюк А.М. Режими роботи роторно-пульсаційного апарата для приготування рідких кормів з використанням частотного перетворювача. *Системні дослідження в енергетиці*, 2026. №3 (87), с. 36-45. https://doi.org/10.15407/srenergy2026.03.036
2. Резцов В.Ф., Юрченко О.М., Сироткін В.В. Інвертори і перетворювачі частоти: монографія. Київ: Ліра-К. 2020. 232 с.
3. Горобець В.Г., Сердюк А.М. Дослідження пускових характеристик асинхронного двигуна для привода роторно-пульсаційного апарата з використанням частотного перетворювача. *Енергетика і автоматика*. 2023. №1. С. 122-135. https://doi.org/10.31548/energiya1(65).2023.122
4. Gorobets V.G., Trokhaniak V.I., Obodovich O.M., Serdiuk A.M. Numerical and experimental study of the processes of preparing liquid grain feed in rotary pulsation apparatuses : [Monograph]. – Kyiv.: «PC «Komprint», 2025. – 224 p.

УДК 696.2

ВИКОРИСТАННЯ ТРУБКИ РАНКА-ХІЛША ЯК АЛЬТЕРНАТИВА ТРАДИЦІЙНОМУ ДРОСЕЛЮВАННЮ НА ГАЗОРОЗПОДІЛЬНИХ ПУНКТАХ

Сердюк А.М., Ph.D.
Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

Поточний стан енергетичного сектору України характеризується надмірним споживанням ресурсів, суттєво поступаючись показникам країн ЄС. Для нівелювання даної різниці наша країна активно працює над впровадженням європейських стандартів енергозбереження. Значна увага приділяється екологічним вимогам щодо зменшення викиду шкідливих речовин та парникових газів в атмосферу. Важливими пріоритетами також залишаються підвищення рівня безпеки при експлуатації газових об’єктів.

Зниження тиску газу на ГРП супроводжується різким зниженням його температури (ефект Джоуля-Томпсона). Внаслідок цього виникає ймовірність утворення конденсату у вигляді рідкої та твердої (кристалогідрати) фракцій, що негативно впливає на роботу системи і може призвести до зупинки подачі газу. Для видалення з газу вологи та важких вуглеводнів використовують низькотемпературну сепарацію, адсорбційне осушування тощо [1].

Поширеним способом підготовки газу є підтримання необхідної температури газу за рахунок його часткового спалювання. Проте цей спосіб має певні недоліки: наявність відкритого вогню на ГРП створює ризики виникнення пожеж або вибухів; частина природного газу безпосередньо спалюється, що є фінансовими та технологічними втратами; спалювання природного газу призводить до викиду в атмосферу шкідливих речовин [2].

Тому виникає потреба у пошуку нових безпечних, економічно та екологічно вигідних технологій підготовки газу при подачі його до споживача. Одним із таких напрямів є розробка системи підготовки газу, яка базується на ефекті Ранка-Хілша (використання вихрової труби). Такі системи підготовки газу досить актуальні завдяки своїй автономності (працюють виключно за рахунок енергії тиску транспортуючого газу), відсутності рухомих деталей та здатності миттєво розділяти газовий потік на гарячий та холодний. Дані системи критично важливі для локальної обробки газу (осушення, зниження точки роси) безпосередньо на розподільчих вузлах. Використання вихрової труби при дроселюванні на ГРП є ефективним технологічним рішенням для одночасного зниження тиску газу та його підігріву для боротьби з утворенням кристалогідратів і обмерзанням арматури.

Перелік джерел посилань

1. Драганов Б.Х, Сердюк А.М. Основы адсорбционных процессов. *Енергетика і автоматика.* №3. 2018. С. 126-137. https://doi.org/10.31548/energiya2018.03.126

2. Франчук Ю.Й., Клапченко В.І., Кузнєцова І.О. Алгоритм управління роботою енергоефективних газорозподільчих пунктів. *Управління розвитком складних систем*. 2024. № 59. С. 248-255. https://doi.org\10.32347/2412-9933.2024.59.248-255

УДК 697.1:621.577

АНАЛІЗ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ЕКОЛОГІЧНО ЧИСТИХ СИСТЕМ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ В ІНДИВІДУАЛЬНОМУ БУДІВНИЦТВІ

Постол Ю.О., к.т.н., доцент; Петренко К.Г., ст. викл.

Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

Зростання світового попиту на енергію, обмеженість традиційних ресурсів та погіршення екологічного стану довкілля стимулюють людство до активного впровадження енергозберігаючих технологій та відновлюваних джерел енергії. Сучасні тенденції декарбонізації теплопостачання в секторі індивідуального житлового будівництва передбачають широке використання теплових насосів, які здатні забезпечити високу енергетичну та екологічну ефективність будівель.

Принцип дії теплових насосів базується на перенесенні низькопотенційної теплової енергії довкілля через цикл випаровування холодоагенту при низькому тиску і температурі з його подальшою конденсацією під високим тиском у компресорі. Як джерела тепла можуть виступати повітря, водойми, підземні води та ґрунт, причому верхні шари ґрунту акумулюють сонячне тепло і є найбільш стабільною та надійною середою. У запропонованій схемі робочим тілом

ґрунтового зонда слугує 30%-ний водний розчин гліколю, який поглинає тепло землі та передає його системі. Коефіцієнт перетворення теплового насоса демонструє співвідношення виробленого тепла до спожитої електроенергії, дозволяючи на кожну витрачену кіловат-годину отримувати від 2,5 до 5 кіловат-годин теплової енергії. Для відбору тепла з ґрунту застосовуються горизонтальні чи вертикальні схеми трубопроводів і зондів, а розрахунки параметрів обладнання для будинку охоплюють площу ділянки 200 м² та об'ємну витрату розсолу 1390 л/год.

Окрім геотермального контуру, модельна система інтегрує сонячні колектори для підвищення загального рівня енергозбереження та ефективності. Для згладжування добових і сезонних коливань у виробництві й споживанні тепла використовується акумулюючий бак місткістю 750 літрів. Згідно з результатами комп'ютерного моделювання, річна вироблена енергія розподіляється так, що тепловий насос забезпечує 10 141 кВт·год (75%), тоді як сонячний контур генерує 3 356 кВт·год (25%). Сонячна фракція в загальному енергетичному балансі становить 24,7%, а для потреб гарячого водопостачання цей показник сягає 45,4%. У періоди зниженої сонячної інсоляції або зниження температури води в баку забезпечується її додатковий підігрів через тепловий насос.

Дослідження екологічного впливу розробленої системи свідчить про її повну екологічну чистоту, оскільки вона не передбачає спалювання палива та виключає викиди шкідливих газів на зразок моноксиду вуглецю, діоксиду вуглецю, оксидів азоту чи сірки. Застосування теплового насоса для опалення будинку дозволяє зекономити 11 490 кВт·год енергії на рік та запобігти викидам вуглекислого газу обсягом 2 844 кг. Обладнання є довговічним із розрахунковим терміном служби компресора до 30 років, працює безшумно, є вибухо- та пожежобезпечним, не виділяє алергенів у приміщення та здатне виконувати як зимовий обігрів, так і літнє охолодження за допомогою одного комплексу. Технічна, енергетична та економічна доцільність використання подібних систем на тлі зростання тарифів на теплоносії робить їх надзвичайно перспективними для масового впровадження у новому будівництві регіону.

УДК 699.86:697.1

ВИЗНАЧЕННЯ ЕКОНОМІЧНО ДОЦІЛЬНОЇ ТОВЩИНИ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЇ ЗОВНІШНІХ СТІН НА ОСНОВІ МІНІМІЗАЦІЇ СУКУПНИХ ВИТРАТ

Мейш Ю. А., д. техн. н., професор, Хуторний Д.Є., студент

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

Утеплення зовнішніх стін належить до найдієвіших способів зменшити тепловтрати будівлі. Що товщий шар утеплювача, то менше теплоти проходить крізь стіну, але то більше коштують матеріал і монтаж, тому принцип «чим товстіше, тим краще» економічно виправданий не завжди. Будівельні норми встановлюють лише мінімально допустимий опір теплопередачі стін [1, 2], а

доцільність утеплення понад цей мінімум визначають техніко-економічним розрахунком [3].

Мета роботи – побудувати просту модель сукупних витрат на утеплення 1 м² стіни, знайти її мінімум засобами диференціального числення та оцінити, як на результат впливає тариф на теплову енергію.

Нехай R_0 (м²·К/Вт) – опір теплопередачі стіни без утеплювача, δ (м) і λ (Вт/(м·К)) – товщина й теплопровідність утеплювача, D (К·доба) – градусо-доби опалювального періоду. Тоді річні тепловтрати через 1 м² стіни, кВт·год/м², дорівнюють

$$Q(\delta) = \frac{k}{R_0 + \delta/\lambda}, \qquad k = \frac{24\,D}{1000}.$$

Сукупні витрати за N років складаються з вартості утеплювача разом із монтажем $c_\text{і}$ (грн/м³) і вартості втраченої теплоти за тарифом $c_\text{т}$ (грн/(кВт·год)):

$$C(\delta) = c_\text{і}\,\delta + N c_\text{т}\,Q(\delta) \;\to\; \min.$$

Перший доданок лінійно зростає, другий спадає, тому функція має мінімум. З умови $C'(\delta) = 0$ маємо

$$c_\text{і} - \frac{N c_\text{т}\,k}{\lambda (R_0 + \delta/\lambda)^2} = 0 \;\Rightarrow\; \delta_\text{опт} = \lambda\left(\sqrt{\frac{N c_\text{т}\,k}{\lambda\,c_\text{і}}} - R_0\right).$$

Оскільки $C''(\delta) = 2Nc_\text{т}k\,/(\lambda^2(R_0 + \delta/\lambda)^3) > 0$, знайдена точка є точкою мінімуму. Таку саму структуру мають моделі, що враховують вид палива й дисконтування [3, 4]; у них замість N використовують коефіцієнт приведеної вартості.

Розрахунок виконано для $D = 3500$ К·доба (для обласних центрів України – приблизно від 2240 до 4040 К·доба [5]), $R_0 = 0{,}8$ м²·К/Вт, $\lambda = 0{,}04$ Вт/(м·К) (мінеральна вата), $c_\text{і} = 4000$ грн/м³, $c_\text{т} = 2$ грн/(кВт·год), $N = 20$ років. Отримано $\delta_\text{опт} \approx 0{,}151$ м, тобто близько 15 см (рис. 1). Тепловтрати зменшуються з 105 до 18 кВт·год/м² за рік, а сукупні витрати – з 4200 до 1340 грн/м². Опір стіни $R \approx 4{,}58$ м²·К/Вт перевищує нормативний мінімум 4,0 м²·К/Вт для I температурної зони [2].

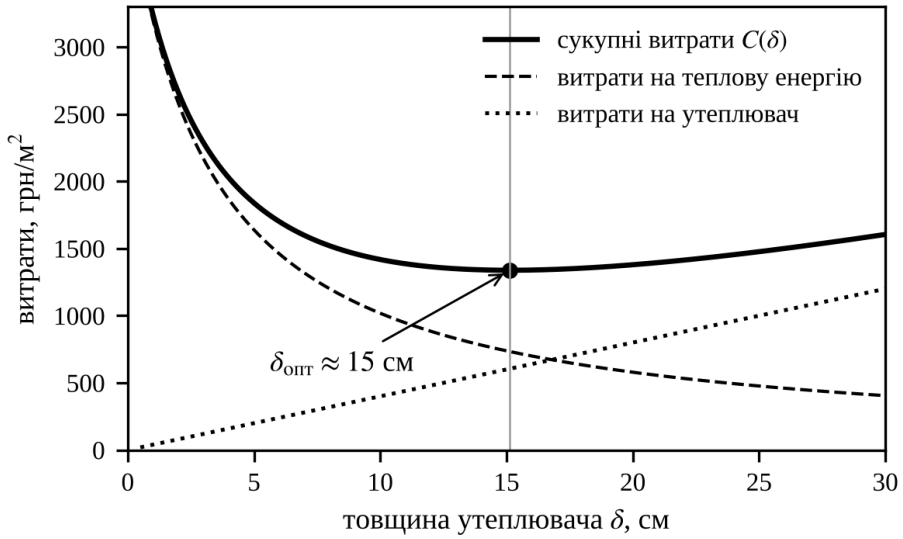


Рис. 1. Залежність витрат на 1 м² стіни від товщини утеплювача

Поблизу мінімуму крива $C(\delta)$ полога: утеплювач товщиною 10 см збільшує витрати лише на 6 %, а 20 см – на 3 %. Тому на практиці можна брати найближчу стандартну товщину плит, переважно більшу. Результат помітно залежить від тарифу: за $c_т = 1{,}5$ грн/(кВт·год) $\delta_{опт} \approx 13$ см, що практично відповідає нормативному мінімуму, а за $c_т = 3$ грн/(кВт·год) – близько 19 см. Отже, подорожчання теплової енергії зміщує оптимум у бік товщого утеплення, що узгоджується з висновками [6]. Критерій мінімального терміну окупності дає менші значення – 80–120 мм [5], адже не враховує економії, отриманої після окупності.

Таким чином, вибір товщини утеплювача зводиться до пошуку мінімуму функції однієї змінної. Отримана формула показує, що $\delta_{опт}$ зростає зі збільшенням тарифу, строку експлуатації та кількості градусо-діб і зменшується з подорожчанням утеплювача. Модель зручна для навчальних і попередніх розрахунків; для проєктування її слід доповнити дисконтуванням і врахуванням теплопровідних включень.

Перелік джерел посилань

1. ДБН В.2.6-31:2021. Теплова ізоляція та енергоефективність будівель. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон України, 2022.
2. Пашинський В. А., Пашинський М. В., Фоміна Т. В. Розвиток методики визначення необхідного опору теплопередачі огороджувальних конструкцій. Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві. 2024. Вип. 22. С. 161–171.
3. Kaynakli O. A review of the economical and optimum thermal insulation thickness for building applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2012. Vol. 16, No. 1. P. 415–425. DOI: 10.1016/j.rser.2011.08.006.
4. Bolattürk A. Determination of optimum insulation thickness for building walls with respect to various fuels and climate zones in Turkey. Applied Thermal Engineering. 2006. Vol. 26, No. 11–12. P. 1301–1309. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2005.10.019.
5. Полив'янчук Н. М., Єфімов О. С., Полив'янчук А. П. Оцінка впливу кліматичного фактору на ефективність термомодернізації зовнішніх стін житлових будинків. Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2026). Вінниця : ВНТУ, 2026. URL: https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2026/paper/view/27473.
6. Voznyak O., Yurkevych Yu., Sukholova I., Dovbush O., Kasynets M. Thermally Conductive Cost of the Heat-insulating Materials. Theory and Building Practice. 2020. Vol. 2, No. 2. P. 92–98. DOI: 10.23939/jtbp2020.02.092.

УДК 699.86:697.1

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЖИТЛОВОГО БУДИНКУ ШЛЯХОМ ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕПЛОВОГО НАСОСА ТА ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

Шульга Ю. О., студент
Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

Зменшення споживання електроенергії системами опалення житлових будівель є одним із напрямів підвищення їхньої енергоефективності. Електричні котли забезпечують просте регулювання температури, однак потребують

значних витрат електроенергії протягом опалювального періоду. Альтернативою є теплові насоси типу «повітря–вода», які використовують низькопотенційну теплоту зовнішнього повітря для нагрівання теплоносія [1, 2].

Метою дослідження є оцінювання можливості зменшення електроспоживання умовного енергоефективного житлового будинку шляхом впровадження теплового насоса та порівняння доцільності застосування сонячної електростанції (СЕС) і вітроенергетичної установки (ВЕУ) для його електропостачання.

Об’єкт дослідження - умовний енергоефективний житловий будинок у місті Суми з водяною системою підлогового опалення. Для аналізу передбачено використання температурних, вітрових і сонячних характеристик місцевості за 2025 рік. У вихідному варіанті джерелом теплоти є електричний котел потужністю 6 кВт. За попереднім теплотехнічним розрахунком річна потреба в теплоті для опалення становить 12 011,08 кВт·год, а витрати електроенергії за ККД котла 98 % -12 256,20 кВт·год.

Для модернізації системи опалення обрано інверторний тепловий насос HeatGuard 45NX типу «повітря–вода». Згідно з технічною документацією, його номінальна теплопродуктивність становить 4,5 кВт, діапазон регулювання - 0,6-5,4 кВт, а паспортний сезонний коефіцієнт ефективності SCOP -4,62 [2]. Низькотемпературний режим підлогового опалення створює сприятливі умови для роботи теплового насоса.

Для попередньої оцінки прийнято розрахункове значення SCOP = 3,5. За умови повного покриття річної потреби в теплоті тепловим насосом його електроспоживання становитиме 3 431,74 кВт·год, а потенційна економія порівняно з електричним котлом -8 824,46 кВт·год на рік, або близько 72 %. Цей результат не враховує додаткових витрат електроенергії резервним джерелом теплоти та допоміжним обладнанням.

За температури зовнішнього повітря -15 °С і температури теплоносія 35 °С теплопродуктивність HeatGuard 45NX знижується до 2,67 кВт [2]. Тому для покриття пікових теплових навантажень передбачено бівалентну схему зі збереженням електричного котла як резервного джерела. Остаточну частку його роботи необхідно визначити за температурним графіком та тепловим навантаженням будівлі.

Додаткове зменшення відбору електроенергії з мережі розглядається шляхом застосування СЕС та ВЕУ. У магістерській роботі доцільність їх встановлення демонструється порівнянням сезонної генерації, відповідності виробітку графіку електроспоживання будинку, капітальних витрат і строків окупності. Сонячна генерація залежить від інтенсивності випромінювання, тоді як виробіток ВЕУ - від швидкості та повторюваності вітру. Поєднання джерел може сприяти кращому узгодженню генерації зі споживанням, проте потребує окремого техніко-економічного обґрунтування.

Отримана попередня оцінка показує потенціал зменшення витрат електроенергії на опалення завдяки тепловому насосу. Подальші розрахунки мають врахувати сезонну зміну його продуктивності, роботу резервного котла та фактичні погодні умови.

Перелік джерел посилань

1. International Energy Agency. The Future of Heat Pumps. Paris : IEA, 2022. URL: https://www.iea.org/reports/the-future-of-heat-pumps.
2. Теплові насоси HeatGuard. Технічний посібник. 2023. 38 с.

УДК 697.34:681.5:004.89

ДИСПЕТЧЕРИЗАЦІЇ ІНДИВІДУАЛЬНИХ ТЕПЛОВИХ ПУНКТІВ БУДІВЕЛЬ: АВТОНОМНІ СТРАТЕГІЇ ВІД РЕГУЛЮВАННЯ ДО ПРОГНОЗУВАННЯ

Мартинюк Л. В., старший викладач; Афінович С. Г., аспірант

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

Постанова Кабінету Міністрів України № 1460 [1] зобов’язала установи державного сектору вести енергомоніторинг будівель. Найбільшу частку в енергоспоживанні таких будівель, зокрема навчальних корпусів, має теплова енергія, що надходить через індивідуальні теплові пункти (ІТП). Локальна погодозалежна автоматика ІТП підтримує температурний графік, проте налаштування змінюють на місці, відмови виявляють за скаргами, а планування режимів не спирається на прогноз. Дослідження зміщуються до наглядового рівня: виявлення несправностей теплових пунктів стримує брак розмічених даних [2]. Вимогою воєнного часу є також стійкість до відключень електроживлення і зв’язку на об’єктах.

Метою дослідження є обґрунтування моделі даних і принципу роботи модуля диспетчеризації ІТП цифрової платформи енергомоніторингу, який поєднує дистанційне задання стратегій регулювання, нагляд за режимами, прогнозування та аналіз стану засобами штучного інтелекту (ШІ), і апробувати їх на стенді.

Структуру ІТП описано схемою (рис.1) із трьома основними контурами: «Зовнішні умови», «Ввід теплової мережі» та «Контур опалення із залежним приєднанням і підмішуванням». Ролі каналів прив’язуються до точок вимірювання контролера, тому схема, пороги і правила не залежать від його моделі. Сам модуль працює на спільному ядрі платформи, що відповідає за конфігурацію об’єктів, збирання і зберігання даних, події та сповіщення. Телеметрія надходить через брокер повідомлень, а контролери буферують її на час відсутності зв’язку.

Стратегію регулювання задано декларативно як упорядкований перелік правил над каналами схеми, опалювальними кривими, добовими профілями та календарем типів днів. Правила виконуються згори донизу кожного циклу, останнє присвоєння перемагає — як у програмованому контролері. Типова програма з дев’яти правил згладжує температуру зовнішнього повітря зі сталою часу 3 год, обчислює уставку $T_З$ за опалювальною кривою з поправкою на добовий профіль температури приміщень і накладає системні обмеження. Програму перевіряє компілятор, її попередньо виконують на прогнозі погоди і

передають у контролер з підтвердженням. Контролер виконує програму автономно, тому втрата зв’язку з ядром не зупиняє регулювання.

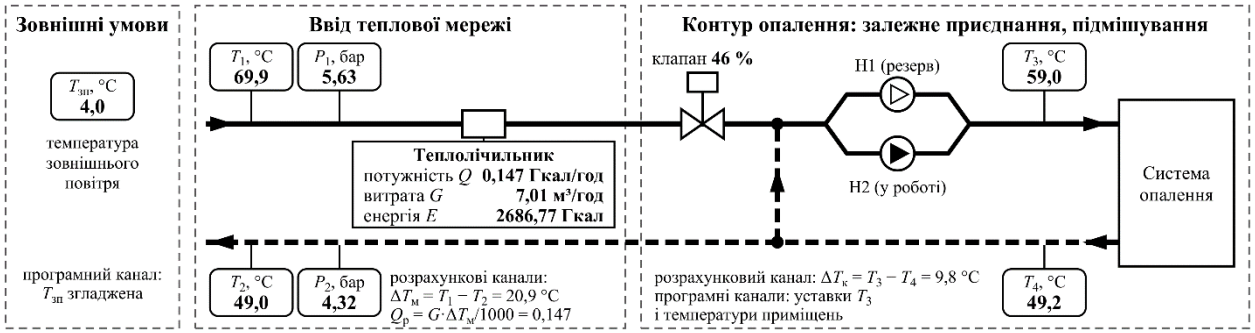


Рис. 1. Схема ІТП як композиція типових контурів (стан ІТП стенду)

Контролери стенду - програмні моделі, що виконують ті самі програми над фізичною моделлю теплопункту з розрахунковими параметрами згідно з [3]; температура зовнішнього повітря – фактична, телеметрія публікується кожні 6 с, цикл регулювання – 60 с.

Для ІТП, схему якого показано на рис.1., розрахункова потужність $G \cdot (T_1 - T_2)/1000 = 7{,}01 \cdot (69{,}9 - 49{,}0)/1000 = 0{,}147$ Гкал/год збіглася з каналом потужності теплолічильника, що підтверджує коректність моделі каналів.

Стенд підтвердив працездатність ланцюга «контролер → брокер повідомлень → архів → правила й аварії → сповіщення та ШІ-аналіз» і зворотного каналу «стратегія → контролер → підтвердження».

Отже, модуль переводить диспетчерську службу від реагування на відмови до їх попередження, а автономне виконання програм на об’єктах підвищує надійність теплопостачання. Кількісну оцінку економії енергії, апробацію на реальних контролерах ІТП та керування з підтвердженням оператора віднесено до подальших досліджень.

Перелік джерел посилань

1. Про впровадження систем енергетичного менеджменту: Постанова Кабінету Міністрів України від 23.12.2021 № 1460. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1460-2021-п (дата звернення: 11.11.2026).

2. Neumayer M., Stecher D., Grimm S., Maier A., Bücker D., Schmidt J. Fault and anomaly detection in district heating substations: A survey on methodology and data sets. Energy. 2023. Vol. 276. Art. 127569. https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127569.

3. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. Київ, 2013.

СЕКЦІЯ 4
АВТОМАТИЗАЦІЯ, ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ ТА РОБОТОТЕХНІКА

УДК 534.6:621.317

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЧАСТОТНИЙ АНАЛІЗ АКУСТИЧНИХ КОЛИВАНЬ МЕТАЛЕВИХ РЕЗОНАТОРІВ

Габльовська Н.Я., к.т.н., доцент; Габльовський Б.Б., к.г.н., доцент
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
м.Івано-Франківськ, Україна

Удосконалення методик неруйнівного контролю та вимірювальних систем вимагає глибокого вивчення амплітудно-частотних параметрів складних коливальних процесів у металевих виробах. Особливу увагу дослідників привертають об'єкти з мідно-бронзових сплавів, чиї вільні затухаючі коливання володіють унікальною просторово-частотною структурою. Завдання точної реєстрації та математичного перетворення таких акустичних сигналів є важливим етапом для розвитку сучасних інформаційно-вимірювальних комплексів.

Основною метою даної роботи є практичне дослідження та цифрова ідентифікація резонансних частот, обертонів і декрементів затухання вільних коливань прецизійних металевих чаш за допомогою алгоритмів спектрального аналізу. Для збору та оцифрування первинних даних було задіяно апаратно-програмний комплекс на базі високочутливих акустичних перетворювачів. Процес аналого-цифрового перетворення здійснювався в середовищі Adobe Audition із параметрами дискретизації 44,1кГц та 16-бітним квантуванням у стереорежимі. Перехід від часової області до частотної реалізовувався шляхом застосування швидкого перетворення Фур'є (FFT) з об'ємом вікна 65536 відліків та використанням віконної функції Blackmann-Harris. Це дозволило ефективно усунути спектральне розмивання, нівелювати побічні пелюсткові спотворення та з високою точністю виділити спектральну картину досліджуваних резонаторів.

Проведені вимірювання засвідчили, що спектр коливань містить стійкі фундаментальні гармоніки (зокрема, ноту F#3 з піковим значенням близько 180 Гц) та багатий спектр високочастотних обертонів, що простягаються до 12кГц і вище при загасанні амплітуди коливань до -108 дБ. Отримані дані підтверджують, що параметри затухання та тривалість реверберації безпосередньо зумовлені геометрією виробу, локальними мікронеоднорідностями товщини та структурою сплаву. Результати роботи можуть бути використані при проектуванні нових сенсорних систем, удосконаленні алгоритмів цифровізації сигналів та розробці методик експрес-тестування якості металевих акустичних систем.

Перелік джерел посилань

1. Multi-sensory Gamma Stimulation Ameliorates Alzheimer’s-Associated Pathology and Improves Cognition / Anthony J. Martorell, et al. // Cell. — 2019. — Vol. 177, Issue 2. — pp. 256–271. DOI: 10.1016/j.cell.2019.02.014

УДК 621.316.729.621.396.6

SOME FEATURES OF THE LINEAR RANDOM PROCESSES AND FIELDS MATHEMATICAL MODELS APPLICATION fOR VIBRATION DIAGNOSTIC SYSTEMS OF WIND TURBINE COMPONENTS USING A TIME SYNCHRONIZATION SYSTEM

Koval V.[1], Dr.Sci, (Eng), Professor; Zvaritch V.[2], Dr.Sci, (Eng); Samkov O.[2],* Dr.Sci, *(Eng); Piskun O.[3]; Samkov B.[2]; Kulesh O.[2]

[1]National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine.

[2] Institute of Electrodynamics of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine.

[3] National Space Facilities Control and Test Center, Kyiv, Ukraine.

Improving the energy efficiency of modern renewable energy sources, including wind energy, is associated with the development of new wind turbines and the implementation and improvement of modern monitoring and diagnostic systems for electric power equipment.

The development of modern diagnostic systems and their implementation in advanced wind turbines makes it possible to significantly improve the operational reliability of these installations. One of the most promising approaches to diagnosing wind turbine components is vibration diagnostics, which is based on non-destructive testing methods and enables the detection of faults at the early stages of equipment operation.

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine jointly with [1]National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine and National Space Facilities Control and Test Center conducts research on the development of multi-level monitoring and diagnostic systems for electrical equipment [1-3], including systems incorporating renewable energy sources. These systems are flexible, allowing customers to establish effective monitoring systems and, in some cases, diagnostic systems for wind turbines. IEC 61850 is well suited for use at the lower levels of such multi-level system hierarchies. The standard specifies three data transmission protocols:

To address the challenges involved in developing wind turbine diagnostic systems, linear random processes], linear AR processes , random periodic processes [2-4], are increasingly being applied. An important task in the application of linear random processes in applied research is the development of methods for their classification [2-4].

Companies involved in the development of such diagnostic systems include Brüel & Kjær, PCB, SPM, Deriton, Bently Nevada, and Timken, as well as manufacturers of large electrical equipment, such as Siemens, ABB, and others. Wireless vibration diagnostic systems are particularly promising, including equipment manufactured by ADVANTECH [5].

The effective operation of wind turbine vibration diagnostic systems that use random variable models requires high-precision synchronization of measurement signals in accordance with the requirements of the IEC 61850 and IEEE 1588 standards. To implement such synchronization, specialists from the National Space

Management and Testing Center, in cooperation with the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine and the Institute of Electrodynamics of the NAS of Ukraine, have developed a laboratory prototype of a time synchronization subsystem comprising a PTP Grandmaster and a PTP Slave implemented in accordance with IEEE 1588 [6, 7].

Conclusions

The proposed method enables the development of algorithms for diagnosing the technical condition of power equipment components, primarily wind turbines, with high accuracy and reliability.

Equipment with hardware support for the IEEE 1588 PTP protocol provides the level of time synchronization required for the design of vibration diagnostic systems that perform coordinated analysis of vibration, electrical, and process parameters during the investigation of fast transient processes and emergency operating conditions.

References

1. Коваль В.В., Самков О.В., Тітко В.О., Вакась В.І., Яніцький І.Я., Осінський О.Л., Самков Б.О., Піскун О.М. Автоматизовані системи синхронізації сигналів з підвищеною відмовостійкістю. Київ: Академперіодика, 2025. 166 с. ISBN 978-966-360-548 https://doi.org/10.15407/akademperiodyka.548.166
2. Samkov O.V., Koval V.V., Lysenko V.P., Kalian D.O., Rybina O.B., Osinskiy O.L. Multichannel clock signal monitoring appliances for Smart Grid networks with speed-optimal phase-locked loop. Tekhnichna Elektrodynamika. 2023. № 1, С. 81–92. doi: 10.15407/techned2023.01.081.
3. Babak V., Babak S., Myslovych M., Zaporozhets A., Zvaritch V. Methods and Models for Information Data Analysis. In: Diagnostic Systems for Energy Equipments. Studies in Systems. Decision and Control. 2020. Vol. 281. Pp. 23-70. https://doi.org/10.1007/978-3-030-44443-3
4. Zaporozhets A., Babak V., Zvaritch V., Kovtun S., Gyzhko Yu., Khaidurov V., Verpeta V. Integration of Physical and Probabilistic Measures in Stochastic Measurements of Manufacturing Processes. MDPI Metrology. 2026. 6. 37. https://doi.org/10.3390/metrology6020037
5. ADVANTECH https://www.advantech.com/en-us/contact (дата звернення:17.10.2026).
6. Коваль В.В., Самков О.В., Вакась В.І., Піскун О.М. Підвищення відмовостійкості систем синхронізації з використанням Cesium Clock / Матеріали 3-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні системи та технології: результати і перспективи» (IST 2026)", м. Київ, 10 березня 2026 р., Київський національний університет імені Тараса Шевченка. – К: ФІТ КНУТШ, 2026. – С.293-295.
7. Коваль В.В., Самков О.В., Вакась В.І., Піскун О.М., Самков Б.О. Підвищення відмовостійкості автоматизованих систем частотно-часового забезпечення з використанням сучасних цифрових технологій / Збірник тез доповідей за матеріалами IV-ї міжнародної наук.-практ. конф. “Цифрові технології в енергетиці і автоматиці”, м. Київ, 5 червня 2026 р., Київ, Україна. – К.: РВВ НУБіП України, 2026. – С.102-103.

УДК 621.316.729.621.396.6

THE IMPACT OF SUBSTRATE EXTRUSION ON THE ENERGY AND ECONOMIC EFFICIENCY OF BIOGAS PLANT OPERATION

K. Kupryaniuk, K. Witaszek, W. Czekała and J. Dach

Department of Biosystems Engineering, Poznań University of Life Sciences, Poznań, Poland

Corresponding author email: karol.kupryaniuk@up.poznan.pl

keywords: *substrates; extrusion; anaerobic digestion; energy efficiency.*

Introduction

The agricultural sector currently underutilises organic waste in the form of so-called lignocellulosic biomass, which can include maize straw, rapeseed straw, leaves and hay (Panigrahi and Dubey, 2019). In recent years, technologies to manage these wastes have been increasingly developed. As an example, they can be used in agricultural biogas plants, where heat or electricity can be produced. By carrying out a methane fermentation process, it is possible to dispose of biodegradable substances that are a burden on the ecosystem. The full utilisation of these raw materials as a substrate for biogas production is only possible after pretreatment, which allows the lignocellulosic structures to be broken down. This has the effect of increasing the efficiency of biogas production, including methane (Tong et al. 1990; Kozlowski et al. 2018; Dach et al. 2014). One of the pre-treatment methods is extrusion. Extrusion is a HTST (High Temperature Short Time) type of process due to the fact that the material in the extruder stays in it from several seconds to several minutes and is exposed to high temperature. During this time, the material inside is mixed, compacted, compressed, sheared, liquefied and plasticized in the final zone (Oniszczuk et al., 2012). Specific processing conditions contribute to the disintegration of lignin, facilitating access to cellulose and hemicellulose for bacteria (Oniszczuk and Pilawka, 2013). The high pressure and temperature during extrusion contribute to the hydrolysis of lipids, proteins, carbohydrates, hemicellulose, cellulose and the disruption of the cell wall, thanks to which the material becomes plastic.

Agricultural biomass with an increased content of ligni-cellulose compounds is not normally used in biogas plants due to decomposition problems (straw has a structure that is difficult to access for fermentation bacteria). However, their use can bring a significant effect by increasing the energy efficiency and profitability of biogas plants. The methane fermentation process is highly dependent on conditions, availability and type of substrate. Depending on the raw materials used, the gas mixture resulting as a final product can have different contents of methane, carbon dioxide and other components. It is possible to use agricultural by-products such as cereal straw, corn and cotton waste, plant stalks, animal residues (manure, slurry, poultry manure, litter) and others (Gregersen and Raven 2007; Kalina and Skorek 2002; Lantza et al. 2007; Rasi et al. 2007). The production of methane in the anaerobic digestion process is a proven technology, but it is characterized by low profitability. Biogas installations without financial initiative in the form of green and yellow certificates or fixed feed-in tariffs for the sale of electricity and heat would not be cost-effective and could not compete with conventional fuels such as coal or natural gas. There are a lot of factors causing this state of affairs, e.g., the high costs of substrates for biogas production, a limited supply of local raw materials, and limited availability of innovations that would make biogas energy production cost-effective (Witaszek et al. 2020). Lignocellulose found in plant raw materials is a polymer consisting of three main fractions: cellulose (40-55% DM), hemicellulose (24-40% DM) and lignin (18-25% DM). Because they belong to long-chain polysaccharides that are hydrolysed to a mixture of pentoses and hexoses, they can be used as a substrate for biogas production (Tan et al. 2008). As research has shown (Rodiahwati and Sriariyanun, 2016), the use of the extrusion

process in the preparation of raw materials for anaerobic digesion may be justified. Several factors influence the extrusion process: the degree of comminution of the raw materials, the speed of the extruder screw, the plasticising system used, the use of a suitable extruder (single-screw, twin-screw), the appropriate level of wetting of the raw material and the process temperature. An important parameter affecting the extrusion process is the degree of fineness of the substrates, which affects their more effective mixing and obtaining a homogeneous mixture (e.g. for chopped rye straw the lengths are assumed to be: 1-3 mm, 8-11 mm, 10-15 mm and 20-40 mm) (Kupryaniuk et al. 2020). The processing of the raw material, regardless of its structure, is only possible through the use of optimal wetting. A difference in the moisture content of the raw material of even 1% can increase the energy intensity of the process by up to 100%. In this case, additional pressure-thermal treatment of the lignocellulosic pulp may not be economically justified.

The aim of the work was to investigate the impact of extrusion of two types of straw (cereal and rapeseed) on increasing the efficiency of methane production and the energy and economic efficiency of the operation of a biogas plant with a capacity of 0.5 MW.

Materials and methods

In the study, 2 types of extruded substrates were used to feed the biogas plant: cereal straw and rapeseed straw. Both types of straw were shredded using a CF420B flail shredder (Pavolt, Zrębice, Poland) to particle sizes below 10mm and then extruded using a TS-45 single-screw extruder (Z.M.Ch Metalchem, Gliwice, Poland), and then all substrates were tested for methane yield according to standard methodologies (DIN 38414/S8 and VDI 4630) (Dach et al. 2014) and contrasted with tests on straw without pretreatment. Biogas yield testing was conducted under standard methane fermentation conditions in sets of 3 tank biofermenters (Czekała 2017). The 2 dm^3 fermentation reactors were first filled with inoculum (a dose of microorganisms from a working biogas plant) and raw materials processed under different conditions. The organic dry matter content of the inoculum varied from 1.5 to 2%. Dry matter and organic dry matter were checked before testing and the substrates were placed in an airtight digestion reactor. The reactors were placed in temperature-controlled water (approximately 39°C), which simulated the actual operating conditions of commercial biogas plants. The volume and qualitative composition of the gases produced were measured every 24 hours. The fermentation process was stopped when the daily biogas production was less than 1% of the total biogas production. Samples were tested in triplicate. Biogas yield (m3 Mg^{-1}) was expressed in terms of fresh matter, dry matter and dry organic matter, as described by Dach et al. (2014).

In the calculation of the efficiency of the biogas plant operation, two variants of biogas plant power supply were tested:

1. Variant 1: cereal straw + pig slurry and extruded cereal straw + pig slurry;
2. Variant 2: rapeseed straw + pig slurry and extruded rapeseed straw + pig slurry.

Energetic and economic calculations were carried out according to a standard methodology, based on market prices in Poland in May 2024 and taking into account the additional amount of electricity used during the extrusion of both types of straw.

Results and discussion

The results of anaerobic digestion tests and preliminary energetic and economic analysis are presented in Table 1.

Table 1. Methane efficiency of the tested substrates and preliminary energetic and economic analysis for variants I and II

Substrate	D. M.	Methane efficiency	Substrate use	Electric energy spent for extrussion	Electric energy to use	Substrate cost (straw)	Revenue from electricity sold
Variant I	%	$m^3 \cdot Mg^{-1}$	Mg/a	MWh	MWh	EUR	EUR
Wheat straw	88.51	197.18	5150	0	3854.50	301.678	879.450
Wheat straw after extrusion	91.96	213.72	4750	1220.75	2632.69	278.246	600.680
Variant II							
Rapeseed straw	90.70	205.07	4950	0	3853.14	289.962	879.141
Rapeseed straw after extrusion	90.62	228.79	4440	888.00	2967.84	260.087	677.148

In both variants, an increase in methane production from straw was observed, but this increase was relatively small (8.4% in the case of wheat straw and 11.6% in rapeseed straw). The increase in the efficiency of methane production from the same amount of straw resulted in a decrease in the mass necessary to power a biogas plant with a capacity of 0.5 MW, from 5150 to 4759 Mg/year in the case of wheat straw and from 4950 to 4400 Mg in the case of rapeseed straw, respectively. In this case, there are savings due to the smaller amount of straw needed, at the level of 23.4 kEUR in variant I and 29.9 kEUR in variant II.

However, during further calculations, it must be taken into account that the extrusion process requires additional electricity, which increases the cost of this technology. Therefore, taking into account the cost of electricity necessary for the extrusion process, it should be concluded that in both variant I and variant II, the revenue from the sale of electricity from a biogas plant powered by straw is higher in the variant without extrusion, respectively 278.7 kEUR in the case of wheat straw and 202 kEUR in the case of case of rapeseed straw.

Conclusions

The research presented above confirms that it is possible to process lignocellulosic materials using a TS-45 single-screw extruder. On the basis of the research carried out, it was observed that the application of the extrusion technique to lignocellulosic raw materials had a differential effect on the properties of potential substrates for biogas plants. The extrusion process increases the efficiency of CH_4 production during anaerobic digestion of lignocellulosic substrates such as various types of straw. However, various parameters of the extrusion process influence the increase in productivity. Problems have been observed due to the dosage of raw material. In the studies discussed, the increase in CH_4 production was so low (8.4% in the case of cereal straw and 11.6% in rapeseed straw) that it did not cover the increase in electricity consumption resulting from the operation of the extruder. As a consequence, the use of the extrusion process in the analyzed variants of biogas plants gave a negative economic result. Therefore, it should be concluded that further research is necessary on the optimization of the extrusion process in order to increase the efficiency of CH_4 production from straw with reduced energy demand. It would be desirable to extend the scope to include further publicly available raw materials. A second direction for extending the research is the selection of appropriate process variables (temperature, extruder screw speed, raw material moisture content), as well as the selection of a suitable screw for the extruder. The next step could be the use of advanced technologies such as heat recovery systems (recuperators) or efficient cooling systems. The use of modern process monitoring technologies is crucial for their ability to provide precise control over the course of the esctrusion process. They enable the key parameters of the process to be monitored in real time, identify potential problems and respond quickly to any irregularities. As a result, they will contribute to the efficiency, quality and profitability of the process.

References

Panigrahi, S.; Dubey, B.K. A critical review on operating parameters and strategies to improve the biogas yield from anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste. *Renew. Energy* 2019, *143*, 779–797.

Tong M., Smith LH., McCarty PL. 1990. Methane fermentation of selected lignocellulosic materials. Biomass, 21: 239-255.

Kozłowski K., Dach J., Lewicki A., Cieślik M., Czekała W., Janczak D., Brzoski M. 2018. Laboratory simulation of an agricultural biogas plant start-up. Chem. Eng. Technol., 41(4): 711-716. https://doi.org/10.1002/ceat.201700390

Dach J., Czekała W., Boniecki P., Lewicki A., Piechota T. 2014. Specialised internet tool for biogas plant modelling and marked analysing. Adv. Mater. Res., 909, 305–310. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.909.305.

Gregersen K.H., Raven R.P.J.M. 2007. Biogas plants in Denmark: successes and setback. Renew. Sust. Energ. Rev., 11, 116-132. https://doi.org/10.1016/j.rser.2004.12.002

Kalina J., Skorek J. 2002: Paliwa gazowe dla układów kogeneracyjnych; Seminarium cykliczne „Elektroenergetyka w procesie przemian" - Generacja rozproszona, Politechnika Śląska, 11-26.

Lantza M., Svenssonb M., Bjornssonb L., Borjessona P. 2007. The prospects for an expansion of biogas systems in Sweden-Incentives, barriers and potentials. Energy Policy, 35, 1830-1843.

Rasi S., Veijanen A., Rintala J. 2007. Trace compounds of biogas from different biogas production plants. Energy, 32, 1375-1380.

Witaszek K., Pilarski K., Niedbała G., Pilarska A. A., Herkowiak M. Energy Efficiency of Comminution and Extrusion of Maize Substrates Subjected to Methane Fermentation. *Energies*. 2020; 13(8):1887. https://doi.org/10.3390/en13081887

Oniszczuk T., Wójtowicz A., Mitrus M., Mościcki L., Combrzyński M., Rejak A., Gładyszewska B. 2012. Influence of process conditions and fillers addition on extrusion-cooking efficiency and SME of thermoplastic potato starch. TEKA Commission of Motorization and Energetics in Agriculture, 12(1), 181-184.

Oniszczuk T., Pilawka R. 2013. Wpływ dodatku włókien celulozowych na wytrzymałość termiczną skrobi termoplastycznej. Przemysł Chemiczny, 2, 265-269.

Rodiahwati W., Sriariyanun M. 2016. Lignocellulosic biomass to biofuel production: integration of chemical and extrusion (screw press) pretreatment. KMUTNB Int. J. Appl. Sci. Technol., 9, 289-298. https://doi.org/10.14416/j. ijast.2016.11.001

Czekała W. 2017. Concept of in oil project based on bioconversion of by products from food processing industry. J. Ecol. Eng., 18, 180–185. https://doi.org/10.12911/22998993/76211.

УДК 004.89:631.86:662.767.2

ОБҐРУНТУВАННЯ НАПРЯМУ ДОСЛІДЖЕНЬ ЩОДО РОЗРОБКИ СИСТЕМИ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ДЛЯ АГРОХІМІЧНОГО ВИКОРИСТАННЯ ПРОДУКТІВ БІОГАЗОВОГО ВИРОБНИЦТВА

Опришко О.О., к.т.н., доцент, Глущенко О.В, аспірант

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

Глобальна продовольча безпека дедалі більше залежить від доступності мінеральних добрив. Нестабільність у регіоні Перської затоки, де зосереджено провідних виробників сечовини та сірки — основи азотних добрив, — формує реальну загрозу кризи на ринку агрохімікатів Європи й Азії [1]. На цьому тлі вторинні продукти біогазового виробництва — дигестат та органічні пелети на основі рослинної сировини — набувають стратегічного значення як альтернативне джерело доступного азоту та органічної речовини для відновлення родючості ґрунтів.

Традиційно сировиною для біогазових установок (БГУ) слугує гній ВРХ та послід птиці. Проте їх переробка є радше вимушеним екологічним заходом. Використання рослинної сировини у вигляді спеціально підготовлених пелет відкриває якісно новий рівень керованості процесу: пелети можна зберігати тривалий час і рівномірно завантажувати реактор протягом року, що усуває сезонну залежність. НУБіП України вже має напрацювання у розробці таких пелет, що формує унікальну конкурентну перевагу [2]. Поряд із цим рідка фракція дигестату з рослинної сировини є перспективним замінником азотних добрив, а тверда — джерелом органічної складової для відновлення гумусу. Проте агрохімічна ефективність цих продуктів суттєво варіює залежно від складу вхідної маси та умов зброджування.

Ключовою науково-технічною проблемою є відсутність інтегрованих автоматизованих систем, які б давали змогу формувати адаптовані агрохімічні рекомендації щодо застосування дигестату безпосередньо на основі даних про

склад сировини, режими зброджування та стан ґрунтів. Виробники змушені покладатися на узагальнені нормативи, що не враховують специфіку рослинної сировини та особливостей її переробки, зокрема піноутворення [3]. Жодна з відомих СППР у галузі точного землеробства не вирішує цього завдання комплексно для продуктів БГУ.

Метою запланованого дослідження є розробка та верифікація інтелектуальної комп'ютерно-інтегрованої системи підтримки прийняття рішень (СППР) щодо раціонального агрохімічного використання дигестату та органічних пелет на основі рослинної сировини.

Для досягнення мети планується реалізувати гібридну архітектуру СППР, що поєднає: (1) модуль машинного навчання (XGBoost, MLP) для прогнозування агрохімічної ефективності дигестату залежно від складу вхідної сировини та умов зброджування; (2) геоінформаційну підсистему (PostGIS) для просторового аналізу придатності угідь і розрахунку норм внесення добрив з урахуванням сезонних обмежень; (3) модуль дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) на основі Sentinel-2 та БПЛА для автоматизованого моніторингу стану посівів і оцінки сировинного потенціалу БГУ; (4) базу агрохімічних знань і правил для верифікації ML-рекомендацій [4]. Програмна реалізація планується на стеку Python/FastAPI, React, PostgreSQL/PostGIS.

Навчальну вибірку для ML-моделей буде сформовано на унікальній базі НУБіП України: стаціонарний дослід із системи використання добрив та фітотронна база кафедри рослинництва забезпечать відтворювані агрохімічні експерименти (3 культури × 5 доз дигестату × 4 повторності). Поєднання тривалого стаціонарного досліду з цифровим конвеєром обробки геопросторових та агрохімічних даних є підходом, що суттєво ускладнює некоректне запозичення ідей і методів [5].

Очікувана наукова новизна роботи полягатиме у: (1) першій в Україні гібридній архітектурі СППР, що інтегрує ML-движок, ГІС-підсистему та базу агрохімічних знань для сектору БГУ з рослинної сировини; (2) нових алгоритмах прогнозування агрохімічної ефективності дигестату з урахуванням піноутворення та складу пелет; (3) методі автоматизованого ДЗЗ-моніторингу сировинного потенціалу БГУ, інтегрованому в програмний конвеєр СППР.

Результати дослідження будуть орієнтовані на впровадження на біогазових підприємствах, в агрохолдингах та дорадчих службах АПК України як інструмент обґрунтованого застосування органічних добрив на основі дигестату в умовах дефіциту мінеральних азотних ресурсів.

Перелік джерел посилань

1. Lovarelli D., Bacenetti J., Fiala M. Digestate management in bioenergy systems: Environmental and economic aspects. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2019. Vol. 103. P. 116–131. https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.034

2. Vitashek K., Shvorov S. A., Opryshko O. O. та ін. Підвищення виходу біогазу в біогазових установках за рахунок додавання сироватки до гною ВРХ. Енергетика і автоматика. 2025. № 1(77). С. 5–16. https://doi.org/10.31548/energiya1(77).2025.005

3. Bhatt A. H. et al. Anaerobic digestion in organic waste management: A critical review of digestate characterization and utilization. Bioresource Technology. 2021. Vol. 339. 125604. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125604
4. Drucker P., Cann A. Machine learning applications in smart agriculture: A systematic review. Computers and Electronics in Agriculture. 2020. Vol. 171. 105302. https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105302
5. Opryshko O. et al. Evaluation of promising areas for biogas production by indirect assessment of raw materials using satellite monitoring. Sustainability. 2025. Vol. 17(5). 2098. https://doi.org/10.3390/su17052098
6. Zablodskiy M. et al. A methodical approach to the grounding of the raw material base for biogas plants. Pollack Periodica. 2025. Vol. 20(2). P. 124–129. https://doi.org/10.1556/606.2024.00966

УДК 681.5:631.33

ІННОВАЦІЙНІ ПІДХОДИ ДО ДИНАМІЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ СІВБИ В СИСТЕМАХ ТОЧНОГО ЗЕМЛЕРОБСТВА

Іванов І.М.[1], аспірант; Опришко О.О.[1], канд. техн. наук, доцент
[1]Національний університет біоресурсів і природокористування України, м.Київ, Україна

Розвиток сучасного агропромислового комплексу нерозривно пов'язаний із впровадженням технологій точного землеробства, де прецизійний висів просапних культур відіграє визначальну роль. Формування оптимального насіннєвого ложа, суворе дотримання глибини загортання та рівномірне просторове розміщення насіння є критичними факторами для забезпечення дружніх сходів [1]. Відхилення від оптимальних параметрів сівби можуть призводити до неоднорідності посівів та значних економічних втрат, що зумовлює необхідність розроблення нових інженерних рішень.

Переважна більшість традиційних сівалок використовує статичний принцип налаштування, коли базові технологічні параметри задаються механізатором перед початком роботи. Однак мікрорельєф, вологість та щільність ґрунту можуть кардинально змінюватися в межах одного проходу агрегату. Збільшення робочих швидкостей агрегатів понад 11-14 км/год фізично унеможливлює якісне виконання операції класичними дозаторами [2]. Це зумовлює гостру необхідність переходу від жорсткого механічного регулювання до інтелектуальних систем динамічної адаптації в режимі реального часу.

Фундаментом системи адаптивного керування є сенсорна мережа. Оптичні та інфрачервоні датчики стикаються з проблемою рикошету насіння та високої запиленості при швидкісному висіві [2]. Перспективним є використання систем комп'ютерного зору (наприклад, моделі YOLO), що дозволяють розпізнавати стан кожної комірки висівного диска в процесі його обертання [3]. Це переводить моніторинг із розряду простої фіксації факту проходження насінини до аналізу якості роботи самого дозатора.

Критичним аспектом є стабілізація глибини загортання. Пасивні пружинні системи не здатні адекватно реагувати на зміну твердості ґрунту. Передові інноваційні підходи передбачають впровадження активних електрогідравлічних систем контролю притискного зусилля. Інтелектуальна система визначає

фактичний опір ґрунту та оперативно коригує тиск у гідроциліндрах кожної висівної секції, запобігаючи виглибленню сошників або надмірному ущільненню бічних стінок борозни. [1].

Ефективна реалізація динамічного керування вимагає переходу на індивідуальні електромеханічні приводи для кожного висівного апарата. Електропривод усуває похибки від проковзування колеса та дозволяє компенсувати зміну швидкості на поворотах. Керування високодинамічними приводами здійснюється алгоритмами на базі нечіткої логіки (Fuzzy-PID), що дозволяє досягти мінімального часу реакції системи [2].

Для подолання фрагментованості сучасних рішень пропонується концептуальна архітектура інтегрованої системи адаптивного керування. Вона являє собою безперервний замкнений цикл, що об'єднує підсистему збору даних, обчислювальне ядро та комплекс виконавчих механізмів. Інтелектуальний модуль аналізує інформацію від датчиків і систем технічного зору [3], формуючи узгоджені керуючі впливи. Впровадження такого підходу дозволить створити посівні машини нового покоління для роботи в автономному адаптивному режимі.

Перелік джерел посилань

1. Nemergut K. T., Thomison P. R., Carter P. R., Lindsey A. J. Planting depth affects corn emergence, growth and development, and yield. Agronomy Journal. 2021. Vol. 113, No. 4. P. 3351–3360. DOI: 10.1002/agj2.20701.
2. Wang W., Wu K., Zhang Y., Wang M., Zhang C., Chen L. The Development of an Electric-Driven Control System for a High-Speed Precision Planter Based on the Double Closed-Loop Fuzzy PID Algorithm. Agronomy. 2022. Vol. 12, No. 4. P. 945. DOI: 10.3390/agronomy12040945.
3. Zheng Y. et al. Research on an Online Detection Method of Seed Filling Performance for a Pneumatic Suction Seed Metering Device Based on YOLOv8-MA. AgriEngineering. 2026. Vol. 8, No. 6. P. 240. DOI: 10.3390/agriengineering8060240.

УДК 004.054

ЕМУЛЯЦІЯ СЕНСОРНИХ ДАНИХ ДЛЯ ТЕСТУВАННЯ АВТОНОМНИХ АГРАРНИХ ПЛАТФОРМ У НЕСТРУКТУРОВАНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Голояд Ю.Л., аспірант; Дудник А.О., кандидат технічних наук, доцент
Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна.

Автономні аграрні платформи працюють у полі, де немає розмітки і смуг руху, поверхня нерівна, а стан ґрунту й рослин змінюється від проходу до проходу. Польових випробувань для перевірки їхнього програмного забезпечення недостатньо: сезон робіт короткий, а небезпечну ситуацію неможливо повторити в тих самих умовах. Для дорожніх систем автономного водіння цю проблему розв’язують перенесенням основної частини перевірки в симуляцію [1].

Методи формування тестових наборів для дорожнього руху добре розвинені. Вони шукають різні за причиною відмови [2], повністю покривають

простір параметрів сценарію [3], уточнюють межу небезпечної області [4] або відбирають показові випадки із записів реальних поїздок [5]. Усі вони описують сценарій через смуги руху, дистанцію та швидкість сусідніх автомобілів і формують саме сценарій, а не потік даних датчиків. Для поля такий опис непридатний.

Створення самих сенсорних даних має власні обмеження. Генеративні моделі якісно відтворюють окремий кадр, проте допускають розриви між сусідніми кадрами, а тривалість обчислень заважає роботі в реальному часі [6]. За даними огляду [1], лише 62,5 % небезпечних ситуацій, знайдених у симуляторі, закінчуються зіткненням у реальних умовах, і найбільша розбіжність припадає на ніч та дощ. У суміжній галузі безпілотних літальних апаратів похибки синхронізації часу між бортовими системами сягають від мілісекунд до секунд, формати калібрування датчиків різняться, а статичні набори даних не передають погодних впливів і погіршення роботи датчиків [7].

Наявні програмні засоби закривають окремі частини задачі. Симулятори на основі Unreal Engine 5 передбачають відтворення снігу, туману, вітру й дощу та зміну складу камер [8]. Апаратно-програмні комплекси з режимом симуляції дають змогу перевіряти компоненти систем керування без фізичного обладнання [9].

На основі проведеного аналізу пропонується розглядати емулятор сенсорних даних як окремий програмний шар між моделлю поля і системою керування, що перевіряється. До нього сформульовано чотири вимоги. Перша — єдина шкала часу для камери, лідара, інерціального датчика та приймача супутникової навігації, кожен з яких працює зі своєю частотою. Друга — відтворення коливань корпусу на нерівностях, що зміщують покази датчиків один відносно одного. Третя — моделювання завад, властивих полю: пилу, густої рослинності, проковзування коліс. Четверта — подача даних у темпі реальної роботи платформи. Для виконання останньої вимоги доцільна подієва архітектура з чергами повідомлень: у суміжній задачі перехід до неї від монолітної системи зменшив середню затримку з 620 до 210 мс [10]. Скоротити кількість тестових прогонів без втрати покриття дозволяють еволюційні алгоритми добору тестових наборів [3, 11].

Подальша робота передбачає реалізацію прототипу емулятора та порівняння емульованих даних із записами датчиків реальної платформи.

Перелік джерел посилань

1. Tang S., Zhang Z., Zhang Y. et al. A Survey on Automated Driving System Testing: Landscapes and Trends. arXiv:2206.05961. 2023. URL: https://arxiv.org/abs/2206.05961

2. Ji X., Xue L., He Z., Luo X. Autonomous Driving System Testing via Diversity-Oriented Driving Scenario Exploration. ACM Transactions on Software Engineering and Methodology. 2025. Vol. 34, No. 7. Article 201. DOI: 10.1145/3727875

3. Min H., Zhang Z., Fan T., Zhang P., Zhang C., Qu G. Full Coverage Testing Method for Automated Driving System in Logical Scenario Parameters Space. Sensors. 2025. Vol. 25. Article 5764. DOI: 10.3390/s25185764

4. Wu X., Chen J., Wu J., Zhang L., Xia T., Shen Y. Make Full Use of Testing Information: An Integrated Accelerated Testing and Evaluation Method for Autonomous Driving Systems. arXiv:2501.11924. 2025. URL: https://arxiv.org/abs/2501.11924

5. Qian C., Xu J., Xing X., Guo F. Test case sampling optimization for safety validation of automated driving systems. Nature Communications. 2026. Vol. 17. Article 3114. DOI: 10.1038/s41467-026-69675-8
6. Song Q., Ye H., Harman M., Sarro F. Generative AI for Testing of Autonomous Driving Systems: A Survey. ACM Transactions on Software Engineering and Methodology. 2026. DOI: 10.1145/3806653
7. Bauzha O., Hloba Y. Scientific trends in UAV autonomy: vision, intelligence, and cooperative navigation. Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security. 2026. Вип. 1. С. 9–18. DOI: 10.32782/IT/2026-1-2
8. Бойко А. П., Шумаков М. В. Розробка програмного забезпечення симулювання польоту безпілотних літальних апаратів. Вісник ХНТУ. 2025. № 1(92), ч. 1. С. 303–308. DOI: 10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.41
9. Заміховський Л. М., Николайчук М. Я., Стрілецький Ю. Й., Левицький І. Т. Розроблення апаратно-програмного комплексу для тестування компонентів систем керування на базі RTU SCADAPack 474. Методи та прилади контролю якості. 2025. № 2(55). С. 90–100. DOI: 10.31471/1993-9981-2025-2(55)-90-100
10. Завгородня Г., Завгородній В., Голубенко О., Антоненко А. Засоби забезпечення масштабованості та автономності системи адаптивної генерації контенту. Технології та інжиніринг. 2025. Т. 26, № 6. С. 21–31. DOI: 10.30857/2786-5371.2025.6.2
11. Шкурко В. В., Поляков А. О. Використання математичних і ШІ-моделей в тестуванні програмного забезпечення. Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки. 2025. № 5, ч. 1. С. 340–348. DOI: 10.32782/tnv-tech.2025.5.1.36

УДК 004.93:519.6

ЗАСТОСУВАННЯ ПРИНЦИПУ ПРАВОЇ СТОРОНИ ДЛЯ ВИДІЛЕННЯ ЗОВНІШНЬОГО КОНТУРУ ПЕРЕШКОДИ

Дудник А. О., к.т.н., доцент; Жук Д.Є., аспірант
Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна.

Однією з ключових задач автономної навігації мобільних роботів є формування цифрової моделі навколишнього середовища, придатної для аналізу прохідності, локалізації перешкод та планування маршруту. Для розв’язання цієї задачі найчастіше використовують бінарні карти зайнятості, які дозволяють відобразити розподіл вільного та зайнятого простору [1]. Такий спосіб набув широкого поширення завдяки простоті побудови, оскільки не вимагає значних аналітичних обчислень. Разом із тим даний підхід має свої обмеження: збереження мапи у вигляді матриці вимагає великого об’єму пам’яті, а при необхідності збільшення точності відтворення за рахунок скорочення частоти дискретизації комірок обсяг необхідної пам’яті збільшується у квадратичному масштабі. Крім того, отримана карта залишається дискретним представленням середовища і для виконання практичних завдань, таких як пошук маршруту, потребує додаткової обробки та геометричного аналізу перешкод.

Одним зі способів підвищення ефективності подальших розрахунків є перехід від растрового до аналітичного представлення перешкод. У цьому випадку область перешкоди замінюється набором кривих, що аналітично відтворюють форму її контуру.

Для визначення контуру перешкоди запропоновано алгоритм виділення межі об'єкта на основі принципу правої сторони, який широко використовується у робототехніці для проходження лабіринтів [2]. Даний алгоритм починає роботу з довільної внутрішньої точки перешкоди, після чого визначається гранична точка у вказаному напрямі. Далі здійснюється послідовний обхід межі з постійним дотриманням контакту з правою стороною перешкоди. У результаті формується послідовність точок контуру.

На відміну від поширених підходів, заснованих на аналізі всієї області перешкоди [3], запропонований метод виконує обхід лише її межі. Це забезпечує зменшення обчислювальної складності та дозволяє безпосередньо отримати впорядкований набір граничних точок, що дуже важливо для подальшої апроксимації кривими. Основною проблемою алгоритму є можливість потрапляння на внутрішню порожнину складної перешкоди. У такому випадку формується контур порожнини замість зовнішнього контуру об'єкта. Подібна проблема розглядається і при використанні даного принципу в класичних задачах [4].

Для усунення цього недоліку запропоновано аналіз орієнтації обходу. При використанні принципу правої сторони зовнішня межа об'єкта та межі внутрішніх порожнин мають протилежну орієнтацію обходу. Після отримання контуру обирається довільна горизонталь, на якій перевіряється її крайня права та ліва точка, якщо у лівій точці напрям обходу контуру йде вниз, а в правій – угору (напрям проти годинникової стрілки) – це відповідає зовнішньому контуру. Якщо у лівій точці напрям обходу контуру йде вгору, а в правій – вниз (напрям проти годинника) – область визначається як внутрішня порожнина. У разі виявлення внутрішньої порожнини кожна її точка визначається як така, що належить перешкоді, а алгоритм запускається повторно.

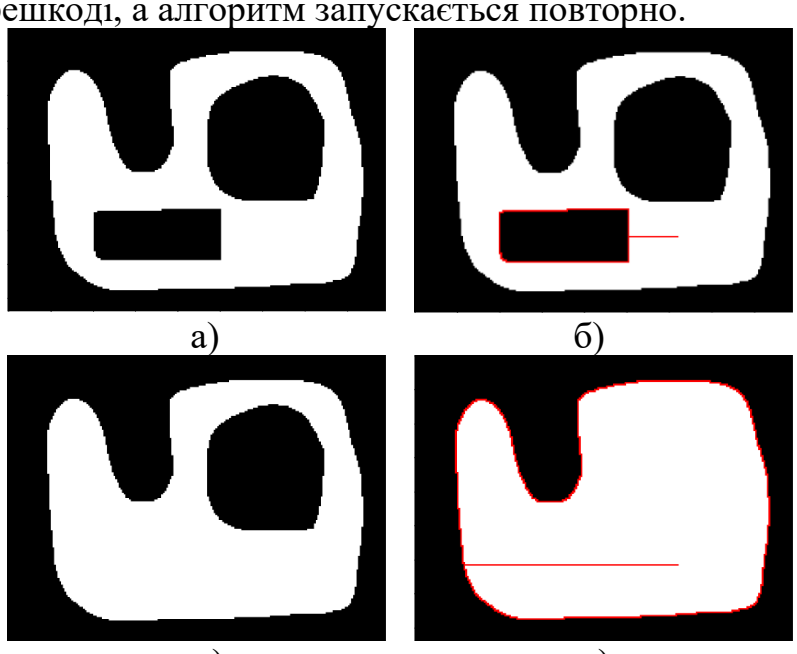


Рис. 1. Приклад роботи алгоритму для перешкоди з внутрішніми порожнинами:
а) вихідне зображення; б) виділення контуру внутрішньої порожнини;
в) усунення внутрішньої порожнини; г) виділення зовнішнього контуру перешкоди.

Проведені експерименти на бінарних картах із перешкодами складної форми підтвердили працездатність запропонованого підходу та можливість коректного виділення зовнішніх меж об'єктів.

Перелік джерел посилань

1. Y. Wang, L. Zhao and S. Huang, "Occupancy-SLAM: An Efficient and Robust Algorithm for Simultaneously Optimizing Robot Poses and Occupancy Map," in *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 41, pp. 4057-4077, 2025.
2. Xing Q, Xu S, Wang H, Wang J, Zhao W, Xu H. Path planning of a mobile robot using an improved mixed-method of potential field and wall following. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2023;20(3).
3. Chang, F., Chen, C.-J., & Lu, C.-J. (2004). *A linear-time component-labeling algorithm using contour tracing technique*. *Computer Vision and Image Understanding, 93*(2), 206-220.
4. Alamri, S., Alamri, H., Alshehri, W., Alshehri, S., Alaklabi, A., & Alhmiedat, T. (2023). An Autonomous Maze-Solving Robotic System Based on an Enhanced Wall-Follower Approach. *Machines, 11*(2), 249.

УДК 621.31: 621.316.729:621.396.6

ЦИФРОВИЙ ПРИСТРІЙ ПОЛІФАЗНОГО КОНТРОЛЮ СИНХРОСИГНАЛУ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

Коваль В.В.[1], д.т.н., професор; Лавінський Д.С.[1]; Осінський О.Л.[3]; Піскун О.М.[1,4]

[1]Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна.
[2]Інститут електродинаміки НАН України, м. Київ, Україна.
[3]Національна академія наук України, м. Київ, Україна.
[4]Національний центр управління та випробувань космічних засобів, м. Київ, Україна.

В інтелектуальних електричних мережах використовують пристрої синхронізації для формування сигналів синхронізації часу [1]. Конструювання пристроїв синхронізації часу (ПСЧ) на основі цифрових програмованих логічних схем потребує ефективної схемотехнічної реалізації вузла виявлення відсутності імпульсу на тактовому інтервалі сигналу синхронізації часу.

Відомий пристрій контролю періодичності імпульсної послідовності тактової частоти [2] забезпечує виконання поставленої задачі, проте має часову затримку інформації про відсутність імпульсу в контрольованому тактовому синхросигналі типу «меандр». Часова затримка інформації залежно від часових співвідношень між контрольованим і опорним сигналами може сягати тривалості тактового інтервалу, що призводить до зниження швидкодії процесу контролю періодичності тактового синхросигналу. З врахуванням зазначеного, актуальною задачею є збільшення швидкодії процесу цифрового контролю періодичності синхросигналу.

Розв'язання поставленої задачі досягається шляхом використання пристрою поліфазного контролю періодичності тактового синхросигналу (ПКПТС), захищеного Патентом України на винахід [3]. Пристрій ПКПТС

містить розподілювач імпульсів, перший, другий і третій лічильники відповідно, логічний елемент І, перший, другий і третій синхронний D-тригер, додатковий перший, додатковий другий і додатковий третій лічильники, додатковий логічний елемент І, додатковий перший, додатковий другий і додатковий третій синхронний D-тригер, другий додатковий логічний елемент І, додатковий розподілювач імпульсів, перший і другий логічний елемент НІ, третій, четвертий, п’ятий, шостий, сьомий і восьмий додатковий логічний елемент І.

Формування сигналу про порушення періодичності до кінця кожного періоду сигналу тактової части, що задається опорним генератором, досягається завдяки введенню трьох лічильників, цикли роботи яких зсунуті у часі один щодо іншого на тактовий інтервал. Отже, в кінці кожного циклу на виході відповідного синхронного D-тригера формується інформація про контрольовану періодичність імпульсної послідовності тактової частоти (наявність необхідної кількості імпульсів тактової частоти або їх відсутність). Зсувом у часі на тактовий інтервал сигналу з опорного генератора і формуванням у такий спосіб трьох синхронних циклів, забезпечується поліфазність контролю. При надходженні на лічильний вхід додаткового лічильника двох імпульсів протягом інтервалу часу, відведеного для підрахунку контрольованих імпульсів тактової частоти, на виході другого розряду даного додаткового лічильника формується сигнал "логічної 1", який свідчить про необхідну наявності контрольованих імпульсів тактової частоти. При відсутності хоча б одного з цих двох імпульсів на виході другого розряду додаткового лічильника формується сигнал "логічного 0", який свідчить про відсутність періодичності імпульсної послідовності тактової частоти (відсутність хоча-б одного імпульсу тактової частоти). Отримана інформація про підраховану кількість контрольованих імпульсів тактової частоти, у разі відсутності хоча б одного імпульсу, відповідно забезпечує раніше формування на виході пристрою сигналу про порушення періодичності тактового синхросигналу, що збільшує швидкодію процесу цифрового контролю.

Для забезпечення практичної реалізації пристрою поліфазного контролю періодичності тактового синхросигналу у складі пристрою синхронізації для формування відмовостійких сигналів синхронізації часу інтелектуальних електричних мереж [4] розроблена функціональна схема та проведені дослідження з використанням часових діаграм.

Перелік джерел посилань

1. Коваль В.В., Самков О.В., Вакась В.І., Пилипенко Ю.В., Яніцький І.Я., Лавінський Д.С. Відмовостійкі системи синхронізації часу інтелектуальних електричних мереж. Монографія / Національний університет біоресурсів і природокористування України. НАН України, Ін-т електродинаміки. Укл. Коваль В.В. та інш. – Київ, 2024. – 317 с.

2. Патент на корисну модель №116809 Україна, МПК Н 03 К 5/19 (2006.01). Пристрій контролю періодичності імпульсної послідовності тактової частоти. Патент на корисну модель №116809 Україна, МПК Н 03 К 5/19 (2006.01) / Коваль В.В., Кальян Д.О., Коваль В.В. (Україна) - № u 2016 11977, Заявл. 25.11.2016, Опубл. Відомості про заявку 12.06.2017, Бюл. № 11. http://uapatents.com/?search=116809&type=number

3. Патент на винахід № 124867 Україна, МПК Н03К 5/19 (2006.01). Пристрій поліфазного контролю періодичності тактового синхросигналу. Пат. № 124867 Україна, МПК Н03К 5/19 / Коваль В.В., Кметик Н.В., Лавінський Д.С., Осінський О.Л., Самков О.В. (Україна) – Заявка

№а 2020 04189, Заявл. 28.07.2020, Опубл. Відомості про заявку 10.12.2020, Бюл. № 23. Опубл. Бюл. №48, 01.12.2021. С.3.38. https://portal.nipo.gov.ua/uk/bulletin
4. Автоматизовані системи синхронізації з підвищеною відмовостійкістю. Монографія / В. В. Коваль, О. В. Самков, В. О. Тітко, В. І. Вакась, І. Я. Яніцький, О. Л. Осінський, Б. О. Самков, О. М. Піскун. Київ: Видавничий центр НУБіП України, 2026. – 300 с. ISBN 978-617-8928-97-1.

УДК 621.31: 621.316.729:621.396.6

РЕЗИЛЬЄНТНІСТЬ ЧАСОВО-ЧАСТОТНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СУЧАСНОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКИ І ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ В УМОВАХ ВОЄННОГО СТАНУ

Коваль В.В.[1], д.т.н., професор; Самков О.В.[2], д.т.н., с.н.с.; Вакась В.І.[3], к.т.н.; Піскун О.М.[1,4]; Самков Б.О.[2]

[1]Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна.
[2]Інститут електродинаміки НАН України, м. Київ, Україна.
[3]Приватне акціонерне товариство «Київстар», м. Київ, Україна.
[4]Національний центр управління та випробувань космічних засобів, м. Київ, Україна.

Стрімкий розвиток цифрових кіберфізичних систем обумовив перехід від локальних автономних пристроїв до великих розподілених інформаційно-керуючих мереж, що об'єднують значну кількість взаємопов'язаних інтелектуальних вузлів. Така тенденція характерна для електроенергетики, телекомунікацій, промислової автоматики та інших галузей, у яких виконуються розподілені вимірювання, керування та обробка інформації.

Сучасні цифрові підстанції, системи диспетчерського керування SCADA, WAMS та інтелектуальні електронні пристрої (IED) дедалі ширше використовують протокол PTP (Precision Time Protocol) IEEE 1588 для забезпечення субмікросекундної точності сигналів синхронізації часу. У сучасних телекомунікаційних мережах PTP став базовою технологією високоточної синхронізації, що широко застосовується в мережах мобільного зв'язку четвертого та п'ятого поколінь (4G/LTE та 5G), транспортних IP/MPLS-мережах, центрах обробки даних.

Ефективним, з точки зору вирішення проблеми підвищення резильєнтності засобів часово-частотного забезпечення, є використання комплексного підходу, який передбачає диверсифікацію джерел синхронізації, застосування стійких до РЕБ технологій, впровадження фізичного та кіберзахисту, децентралізацію мережевої архітектури, а також впровадження технології багатоканального моніторингу і гібридного синтезу синхросигналів [1].

Розроблено математичний апарат для автоматизованого оцінювання поточного стану резільєнтних систем частотно-часового забезпечення, що дає змогу оперативно визначати якість їх функціонування та своєчасно виявляти деградацію сервісу часу.

Перелік джерел посилань

1. Коваль В.В., Самков О.В., Піскун О.М., Осінський О.Л., Самков Б.О. Відмовостійкість засобів часово-частотного забезпечення сучасної електроенергетики і автоматики / Матеріали XII Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування (теорія, практика, історія, освіта)», м. Київ, 20 листопада 2025 р., К., 2025. – С.144-146.

УДК 681.518:620.92

ОЦІНЮВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ЯКОСТІ ТЕЛЕМЕТРІЇ БІОМЕТАНОВОЇ УСТАНОВКИ НА ПЕРИФЕРІЙНОМУ РІВНІ

Бунтов М. І., аспірант; Опришко О. О., к.т.н., доцент

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

Достовірність телеметрії біометанової установки визначає коректність керування, прогнозування виходу метану та роботи цифрових двійників [1; 2], проте на периферійному рівні за обмежених обчислювальних ресурсів її оцінювання формалізоване недостатньо. Виявлення викидів [3] і загальні характеристики якості даних [4] зазвичай розглядають окремо, а лінійне зведення часткових показників дає змогу компенсувати критичний дефект одного показника іншими. Мета роботи – розробити метод оцінювання інформаційної якості багатоканального потоку телеметрії (температура, pH, тиск, витрата біогазу, вміст CH_4, CO_2, H_2S) на периферійному рівні та порівняти його з типовими методами контролю.

Для ковзного вікна з $N = 30$ відліків (період опитування 60 с) обчислюють п’ять критеріїв: повноти K_p, часової синхронності K_t, шумової стабільності K_s, відсутності викидів K_a і фізичної узгодженості K_f (баланс складу газу, межі й швидкість зміни, взаємозв’язок величин). Кожен критерій нормують за мірою дефектності вікна ν:

$$K_i = \min\left\{1;\ \max\left\{0;\ \frac{\nu_{c,i}-\nu_i}{\nu_{c,i}-\nu_{0,i}}\right\}\right\}, \qquad (1)$$

де $\nu_{0,i}$, $\nu_{c,i}$ – допустимий і критичний рівні дефектності. Відлік вважають викидом за ідентифікатором Хампеля [3], якщо його відхилення від медіани центрованого вікна з 7 відліків перевищує $\gamma = 4{,}5$ робастної оцінки розсіювання (1,4826·MAD); запізнювання рішення – 3 відліки. Інтегральний показник

$$I_d = \sum_i w_i K_i, \qquad \sum_i w_i = 1. \qquad (2)$$

Лінійна згортка (2) не виявляє критичних дефектів: вікно з повною втратою даних за $w_p = 0{,}25$ мало б $I_d = 0{,}75$ і потрапило б до класу B. Тому введено правило вето: якщо хоча б один $K_i = 0$, вікно належить до класу C незалежно від I_d (табл. 1).

Таблиця 1 – Класи даних і реакції системи

Клас	Умова	Реакція системи
A	$I_d \geq 0{,}95$	передавання в SCADA і контури керування

B	$0{,}75 \le I_d < 0{,}95$	позначка довіри; команди – після підтвердження оператором
C	$I_d < 0{,}75$ або $K_i = 0$ (вето)	блокування команд, сигналізація, заміна значень AR-оцінкою ($\tau = 180$ хв)

Перевірку виконано на синтетичних даних з відомими мітками (30 діб, 7 каналів, 10 реалізацій, 100 660 неперекривних вікон; параметри генератора – припущення). Сценарії: S1 – норма; S2 – шум (дисперсія ×3,5 для тиску й витрати); S3 – викиди в 1,5 % відліків; S4 – пропуски кадрів епізодами 5–45 хв (≈ 12 % часу); S5 – затримки доставки 30–300 с для 10 % кадрів; S6 – дрейф pH (–0,03 доба$^{-1}$) і вмісту CH_4 (+0,15 % за добу) з калібруванням кожні 10 діб; S7 – комбінація S2, S3, S4 і S6. Вікно невалідне, якщо частка дефектних відліків ≥ 10 %. Базові методи: B1 – контроль діапазону, швидкості зміни й пропусків у ПЛК; B2 – ковзний z-показник ($|z| > 3$ за попередніми 30 відліками); B3 – ідентифікатор Хампеля.

У сценаріях S1–S5 F_1 виявлення невалідних вікон становить 0,97 (точність 0,998, повнота 0,94) проти 0,36–0,55 у базових методів, а в усіх сценаріях, включно з дрейфом, – 0,72 проти 0,46–0,49. Без правила вето F_1 знижується до 0,24, тобто клас C визначає саме вето. Дрейф виявляється лише через порушення газового балансу (у середньому на 8,8 добу після калібрування), тому повнота для «дрейфових» вікон не перевищує 0,20. За випадкових ваг (розподіл Діріхле) F_1 = 0,717–0,730, macro-F_1 = 0,64–0,82. Для прогнозу витрати метану на 60 хв (гребенева регресія, 38 ознак; навчання – 20 діб штатних даних, тест – 10 діб) фільтрація підвищує R^2 у S7 з 0,43 до 0,50 (без дефектів – 0,79), а в S5 незначно знижує (–0,012). Потокова реалізація (Python) потребує 1,08 мс на кадр і 10 416 Б буферів, її результати збігаються з пакетними.

Висновки. Запропонований метод (п’ять критеріїв, інтегральний показник, вето, три класи даних) придатний для потокової реалізації на периферійному вузлі. Критичні дефекти виявляє правило вето; внесок I_d у точність не підтверджено, але він корисний як неперервний показник і для розмежування класів A і B. Обмеження: рівні ν, ваги та пороги експертні; ті самі реалізації використано для підбору параметрів і уточнення сценаріїв; результати синтетичні й потребують перевірки на телеметрії реальної установки з незалежним еталоном. Подальша робота – контроль дрейфу, налаштування ваг, перенесення на промисловий контролер.

Перелік джерел посилань

1. Pavlenko V., Opryshko O., Prudnikova N., Kharchenko Yu., Buntov M. Method of remote monitoring of biomethane production parameters. Energy and Automation. 2026. No. 3 (85). P. 51–60. DOI: https://doi.org/10.31548/energiya3(85).2026.051.

2. Павленко В. М., Петренко А. В., Мартинюк Л. В., Бунтов М. І., Афінович С. Г. Семантична модель доступу до даних моніторингу якості електричної енергії в автоматизованих інформаційно-вимірювальних системах. Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. 2026. № 2 (28). С. 74–79. DOI: https://doi.org/10.20998/2413-4295.2026.02.10.

3. Hampel F. R. The influence curve and its role in robust estimation. Journal of the American Statistical Association. 1974. Vol. 69, No. 346. P. 383–393. DOI: https://doi.org/10.1080/01621459.1974.10482962.
4. Teh H. Y., Kempa-Liehr A. W., Wang K. I.-K. Sensor data quality: a systematic review. Journal of Big Data. 2020. Vol. 7. Art. 11. DOI: https://doi.org/10.1186/s40537-020-0285-1.

УДК 621.311.1:004.89

ЕНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТ ГІБРИДНОЇ СТАНЦІЇ «ФЕС – АБ – ДГ» ІЗ ПРОГНОЗУВАННЯМ ГЕНЕРАЦІЇ ТА НАВАНТАЖЕННЯ: ПОРІВНЯННЯ ПРАВИЛ І ПРОГНОЗНОГО КЕРУВАННЯ

Носик Д. В., здобувач вищої освіти; Кругляк Г. В., PhD, Павленко В. М., к.т.н., доцент;
Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

Системи енергоменеджменту (EMS) гібридних станцій з фотоелектричною станцією (ФЕС), акумуляторною батареєю (АБ) і дизель-генератором (ДГ) зазвичай працюють за правилами: ДГ запускається за низького ступеня заряду АБ і зупиняється після її заряджання [1; 3]. IoT-платформа (MQTT, Modbus) дає змогу використовувати прогнози і перейти до прогнозного керування (MPC) [2]. Попередньо для агропромислового об’єкта з максимумом навантаження 600 кВт показано, що правило з гістерезисом (пуск ДГ за $SoC \le 20$ %, зупинка за $SoC \ge 80$ %, потужність ДГ 0,8 $P_{ном}$) економить 45,4 % палива порівняно з живленням лише від ДГ.

Мета роботи – порівняти витрату палива за правилом з гістерезисом і за MPC з різною точністю прогнозу.

Задача MPC на горизонті 24 год з кроком 1 год – мінімізація витрати палива з урахуванням пусків ДГ:

$$\min \sum_{t=1}^{24} [(aP_{ном}u_t + bP_t)\Delta t + C_п s_t], \qquad (1)$$

за обмежень балансу $P_t + P_{ФЕС,t} - P_{обм,t} + P_{р,t} - P_{з,t} = P_{н,t}$, діапазону $0{,}3P_{ном}u_t \le P_t \le P_{ном}u_t$, динаміки SoC (20–95 %, ККД 0,95), умови пуску $s_t \ge u_t - u_{t-1}$ і кінцевого $SoC \ge 50$ %; u_t, s_t – бінарні змінні. Похибку прогнозу моделювали як

$$\hat{x}_{t+j} = x_{t+j}[1 + \varepsilon \min(1, j/4)], \quad \varepsilon \sim N(0, \sigma^2), \qquad (2)$$

де j – випередження, год; σ – для навантаження, 2σ – для ФЕС. План перераховується щогодини (ковзний горизонт), а відхилення фактичного режиму в межах години (крок 15 хв) компенсує АБ. Прийнято (ілюстративно): ДГ 600 кВт, $a = 0{,}0815$ і $b = 0{,}246$ л/(кВт·год), АБ 1500 кВт·год / 500 кВт, $C_п = 5$ л на пуск (еквівалент зносу). Витрату палива наведено з поправкою на зміну запасу енергії АБ (табл. 1).

Таблиця 1 – Порівняння стратегій керування (розрахунок за припущеннями)

Стратегія	Паливо, л/доба	Робота ДГ, год	Пуски ДГ
Лише ДГ	3734	24	–
Правило з гістерезисом	2039	12	2

МРС, точний прогноз	2006	11	3
МРС, σ = 10 % (4 реалізації)	2006–2009	11	3–4
МРС, σ = 20 % (4 реалізації)	2010–2100	11–13	2–3

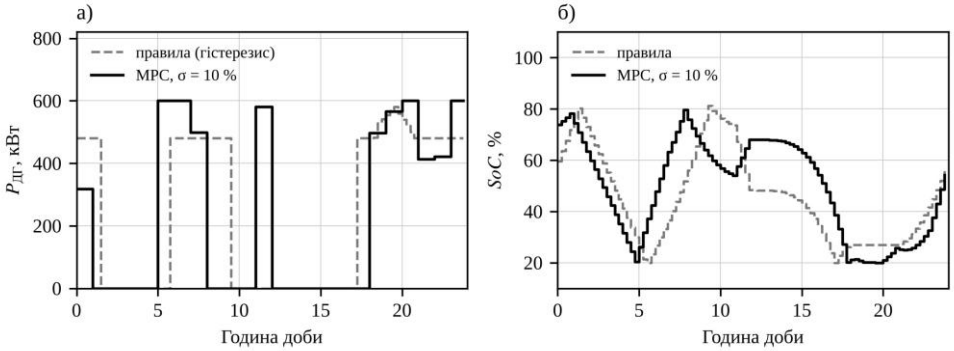


Рисунок 1 – Потужність ДГ (а) і ступінь заряду АБ (б) за правилом і за МРС

За точного прогнозу МРС зменшує витрату палива лише на 1,6 % порівняно з правилом з гістерезисом, оскільки правило вже забезпечує роботу ДГ у зоні високого ККД (0,8 $P_{ном}$) і повне використання генерації ФЕС. Виграш МРС зберігається за σ = 10 % і зникає за σ = 20 %: витрата становить 2010–2100 л/доба, тобто може перевищувати витрату за правилом на 3 %. МРС частіше запускає ДГ (рис. 1, а), зокрема на час короткого провалу генерації ФЕС: кількість пусків зростає з 2 до 3–4 на добу, тому еквівалентна вартість пуску $C_п$ є важливим параметром налаштування. Отже, для об’єкта зі стабільним добовим графіком добре налаштоване правило близьке до оптимального; перевага МРС проявляється за змінних тарифів, обмежень на пуски чи вимог до резерву.

Висновок. На ілюстративному прикладі ефект МРС щодо витрати палива становить близько 1,6 % і чутливий до похибки прогнозу. Подальша робота передбачає оцінку на річних даних, урахування зношення АБ і ДГ у цільовій функції та реалізацію EMS на IoT-платформі з резервним переходом на правило за втрати прогнозу [4; 5].

Перелік джерел посилань

1. Aziz A. S., Tajuddin M. F. N., Adzman M. R., Ramli M. A. M., Mekhilef S. Energy Management and Optimization of a PV/Diesel/Battery Hybrid Energy System Using a Combined Dispatch Strategy. Sustainability. 2019. Vol. 11, No. 3. Art. 683. DOI: https://doi.org/10.3390/su11030683.

2. Manowska A., Wycisk A., Nowrot A., Pielot J. The Use of the MQTT Protocol in Measurement, Monitoring and Control Systems as Part of the Implementation of Energy Management Systems. Electronics. 2023. Vol. 12, No. 1. Art. 17. DOI: https://doi.org/10.3390/electronics12010017.

3. Kaplun V., Kruhliak H., Makarevych S., Kulibaba Y. Dynamic energy management system with real time component control to increase the efficiency of local polygeneration microgrid. Przegląd Elektrotechniczny. 2023. No. 9.

4. Христюк О. А., Павленко В. М. Інтелектуальна система безперебійного живлення сільськогосподарських об’єктів з інтеграцією відновлюваних джерел енергії. Енергоефективний університет: матеріали XIV Міжнар. наук.-практ. конф., Київ, 23 жовт. 2025 р. Київ: КНУТД, 2025. С. 67.

5. Павленко В., Нікітін Є. Інтеграція мікроТЕС Стірлінга в керовані PV–BESS мікромережі. Електромеханічні і енергозберігаючі системи. 2026. № 2 (73). С. 8–15. DOI: https://doi.org/10.32782/2072-2052.2026.2.73.1.

УДК 631.234:620.9:004.89

ДВОКРИТЕРІАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ ДОСВІЧУВАННЯМ ТЕПЛИЦІ: ВАРТІСТЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ТА ДОБОВА ДОЗА СВІТЛА ЗА ЗОННОГО ТАРИФУ

Шмигельський Р. М., здобувач вищої освіти; Ликтей В. В., к.т.н., Павленко В. М., к.т.н., доцент;

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

Світлодіодне досвічування (LED) – найбільший споживач електроенергії тепличного комплексу в осінньо-зимовий період. Прогнозне керування (MPC) дає змогу переносити досвічування на години дешевої енергії та генерації власної фотоелектричної станції (ФЕС) за умови набору заданої добової дози фотосинтетично активного світла (DLI) [1; 2]. Попередньо показано, що для теплиці площею 1 га з ФЕС та акумуляторною батареєю оптимальний графік досвічування зменшує вартість електроенергії на 34–40 % порівняно з таймером. Проте майже вся електроенергія LED перетворюється на теплоту, що взимку заміщує роботу котла, а цільова DLI визначає і врожай, і витрати.

Мета роботи – побудувати залежність мінімальних витрат на електроенергію і теплоту від цільової DLI та оцінити ефект спільного керування світлом і теплом.

Добова потреба в енергії досвічування для площі A

$$E_{\mathrm{LED}} = \frac{(DLI - DLI_{\mathrm{c}})A}{3{,}6\,\eta_{\phi}}, \qquad (1)$$

де DLI, DLI_{c} – цільова і природна доза, моль/(м^2·доба); η_{ϕ} – фотонна ефективність світильників, мкмоль/Дж; E_{LED} – у кВт·год. Цільова функція спільного керування на добовому горизонті з кроком 1 год:

$$\min\Big[\sum_t c_t\, g_t + d\,\max_t g_t + c_q \sum_t (Q_t - q_t)\Big], \quad q_t \le \min\big(P_{\mathrm{LED},t}, Q_t\big), \qquad (2)$$

де g_{t} – потужність з мережі; c_{t} – зонний тариф; d – плата за максимум потужності; Q_{t} – потреба в теплоті; q_{t} – теплота від LED, що заміщує котел; c_{q} – вартість теплоти від котла. За керування «лише за світлом» останній доданок (2) обчислюється для отриманого графіка без оптимізації. Прийнято (ілюстративно): A = 1 га; η_{ϕ} = 2,5 мкмоль/Дж; DLI_{c} = 4 моль/(м^2·доба); LED до 800 кВт, вимкнення 02–05 год; ФЕС до 800 кВт; АБ 2000 кВт·год / 500 кВт; тариф 0,5 / 1,0 / 1,5 ум. од./(кВт·год) (ніч / день / пік); c_{q} = 0,4 ум. од./(кВт·год); Q_{t} = 600 кВт уночі (18–08 год) і 300 кВт удень.

Порівняння двох способів керування для цільових DLI 10–18 моль/(м^2·доба) наведено в табл. 1. За DLI = 10 спільне керування збільшує частку досвічування у 22–07 год з 28 до 47 %: частина досвічування переноситься на ніч, коли потреба в теплоті найбільша і теплота LED заміщує котел.

Таблиця 1 – Добові витрати на електроенергію і теплоту, ум. од. (розрахунок за припущеннями)

DLI, моль/(м^2·доба)	Керування лише за світлом	Спільне керування	Економія, %	Частка LED у 22–07 год, %
10	5137	4674	9,0	47
12	6473	6033	6,8	43
14	8273	7908	4,4	40
16	10259	10156	1,0	33
18	12869	12607	2,0	28

Залежність мінімальних витрат від DLI (табл. 1) є фронтом Парето «витрати – DLI»; він опуклий: граничні витрати на 1 моль/(м^2·доба) зростають з ≈ 550 ум. од. (DLI 8–12) до ≈ 1030 ум. од. (DLI 12–16), оскільки дешева енергія ФЕС і нічного тарифу вичерпується. Спільне керування зменшує сумарні витрати на 1–9 %, найбільше за низької DLI, коли досвічування можна перенести на ніч і використати його теплоту замість котла. За високої DLI LED працюють майже цілодобово, і можливість перенесення зникає. Вибір цільової DLI має ґрунтуватися на зіставленні граничних витрат з приростом урожаю.

Висновок. Урахування теплоти від LED і подання задачі як двокритеріальної дає змогу обґрунтовано вибирати цільову DLI; за прийнятих припущень спільне керування зменшує витрати на 1–9 %. Ефект залежить від співвідношення нічного тарифу та вартості теплоти від котла (прийнято 0,5 і 0,4 ум. од.) і має бути перерахований для фактичних цін. Подальша робота передбачає тепловий баланс теплиці з інерцією, обмеження вологості та CO_2 і модель урожайності [3–5].

Перелік джерел посилань

1. Afzali S., Mosharafian S., van Iersel M. W., Mohammadpour Velni J. Development and Implementation of an IoT-Enabled Optimal and Predictive Lighting Control Strategy in Greenhouses. Plants. 2021. Vol. 10, No. 12. Art. 2652. DOI: https://doi.org/10.3390/plants10122652.

2. Abbaspour M., Shukla M. R., Saxena P. K., Saxena S. Optimal Energy Management in Indoor Farming Using Lighting Flexibility and Intelligent Model Predictive Control. arXiv preprint. 2025. arXiv:2510.03686. URL: https://arxiv.org/abs/2510.03686.

3. Shavelkin A. A., Gerlici J., Shvedchykova I. O., Kravchenko K., Kruhliak H. V. Energy management of a grid-connected, multi-zone billed PV system with battery storage to meet the auxiliary needs of a local facility. Electrical Engineering & Electromechanics. 2021. No. 2. P. 36–42.

4. Shavolkin O., Shvedchykova I., Demishonkova S., Pavlenko V. Increasing the efficiency of hybrid photoelectric system equipped with a storage battery to meet the needs of local object with generation of electricity into grid. Przegląd Elektrotechniczny. 2021. Vol. 97, No. 11.

5. Павленко В., Нікітін Є. Інтеграція мікроТЕС Стірлінга в керовані PV–BESS мікромережі. Електромеханічні і енергозберігаючі системи. 2026. № 2 (73). С. 8–15. DOI: https://doi.org/10.32782/2072-2052.2026.2.73.1.

УДК 621.316:621.34:004.896

УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРИФІКАЦІЇ ВИРОБНИЧОГО ЦЕХУ З РОЗРОБКОЮ АВТОМАТИЗАЦІЇ ЛІНІЇ РОЗЛИВУ

|Томілов О.А., здобувач вищої освіти

Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна

Сучасні підприємства харчової промисловості потребують надійного електропостачання та автоматизованого керування технологічним обладнанням. Особливого значення набуває реконструкція електричних мереж виробничих цехів, у яких експлуатуються електродвигуни, насосні установки, конвеєри та інші електроприймачі. Метою роботи є обґрунтування технічних рішень щодо вдосконалення системи електрифікації цеху та розроблення структури автоматизованого керування лінією розливу продукції [1].

Для попереднього оцінювання параметрів електропостачання запропоновано використовувати залежність (1):

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2}\,, \qquad (1)$$

де S_p — повна розрахункова потужність, кВА; P_p^2 — активна потужність, кВт; Q_p^2 — реактивна потужність, кВАр. Значення для розрахунків є експериментальними та за фактичними характеристиками обладнання.

Для автоматизації лінії розливу пропонується застосування програмованого логічного контролера (ПЛК), датчиків і виконавчих механізмів, що забезпечують керування наповненням, закупорюванням та обліком продукції [2, 3]. Запропоновані рішення створюють передумови для підвищення надійності, безпеки та ефективності роботи виробничого обладнання.

Перелік джерел посилань

1.Walther J., Weigold M. A Systematic Review on Predicting and Forecasting the Electrical Energy Consumption in the Manufacturing Industry. Energies. 2021. Vol. 14, № 4. Article 968. DOI: 10.3390/en14040968. https://doi.org/10.3390/en14040968?utm_source=chatgpt.com

2. Kiangala K. S., Wang Z. An Industry 4.0 Approach to Develop Auto Parameter Configuration of a Bottling Process in a Small to Medium Scale Industry Using PLC and SCADA. Procedia Manufacturing. 2019. Vol. 35. P. 725–730. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.06.015. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.015?utm_source=chatgpt.com

3. Thongphanh P. Development of a PLC-Based Automated Bottling and Capping System for Enhanced Production Efficiency. Souphanouvong University Journal Multidisciplinary Research and Development. 2026. Vol. 12, № 3. P. 104–111. DOI: 10.69692/SUJMRD1203105. https://doi.org/10.69692/SUJMRD1203105?utm_source=chatgpt.com

УДК 681.51:662.767.2

РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПІДГОТОВКОЮ СУБСТРАТУ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ БІОГАЗУ

Настенко М.О., студентка; Дудник А. О., к.т.н., доцент

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

Проблема підвищення енергоефективності біогазових установок та утилізації відходів агропромислового комплексу стає дедалі актуальнішою в умовах нарощування частки альтернативних джерел енергії. Етап підготовки та кондиціювання субстрату є критично важливим для забезпечення стабільності анаеробного зброджування, оскільки високий вміст стійкого лігніну в аграрній біомасі блокує доступ мікроорганізмів до ферментативного гідролізу целюлози й геміцелюлози. Одним із найбільш дієвих методів деструкції лігноцелюлозних субстратів є термомеханічна обробка в шнекових екструдерах під дією підвищених температур (150–175 °C) та значних зсувних зусиль. Проте екструзія характеризується високою енергоємністю, і технологічна доцільність її впровадження визначається виключно додатним чистим енергетичним балансом, за якого додатково отримана енергія біометану перекриває витрати на привод машин [1].

Дослідження робочих режимів екструдерів свідчать, що температурний профіль циліндра безпосередньо впливає на ступінь розпушення біомаси, проте локальний перегрів понад 175 °C веде до термічної деградації сухої речовини, коксування сировини й утворення інгібіторів метаногенезу [3]. Важливим технологічним параметром є також вологість матеріалу, яку необхідно стабілізувати в робочій зоні в межах 25–35 %: зниження вологості менше 25 % викликає надмірне сухе тертя і пригорання, а зволоження понад 35 % призводить до прослизання та втрати транспортувальної здатності шнека [4]. Для підтримання заданої глибини диспергування за мінімальних енерговитрат необхідна адаптивна стабілізація питомої механічної енергії (SME) шляхом узгодженого частотного регулювання швидкості обертання шнека (400–750 об/хв) та продуктивності дозатора.

Реалізація таких вимог потребує створення багаторівневої системи автоматичного керування (САК). Її апаратна основа формується на базі промислового логічного контролера Siemens S7-1200 з модулями аналогового введення та сенсорної панелі оператора Weintek [2]. Вимірювальний комплекс містить платинові термометри опору PT100 у нагрівальних секціях циліндра (зони $T_1 - T_4$), датчики фазних струмів статора приводного електродвигуна (I_1, I_2, I_3), щитовий вимірювач активної потужності та потоковий вологомір на вузлі дозування. Схему функціональних зон матеріального циліндра екструдера та розміщення первинних перетворювачів наведено на рис. 1.

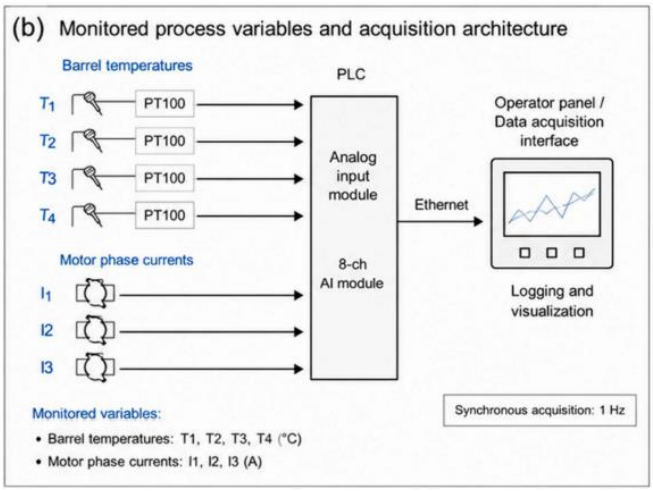


Рис. 1. Функціональна схема зон матеріального циліндра екструдера та розміщення датчиків температури ($T_1 - T_4$) і струму статора ($I_1 - I_3$)

Істотною проблемою експлуатаційної надійності екструдера при переробці абразивної соломи є інтенсивне зношування витків шнека. Абразивне спрацювання робочих кромок збільшує радіальний зазор між витком і стінкою циліндра, що породжує зворотний витік розплаву та неконтрольоване падіння тиску перед матрицею. Для неінвазивного моніторингу в САК інтегровано алгоритм предиктивної діагностики на основі одновимірної згорткової нейронної мережі (1D-CNN), яка за синхронізованими гармоніками трифазного струму статора ідентифікує ступінь зношування шнека безпосередньо під час роботи агрегату [2]. Це усуває потребу в аварійних зупинках для механічного розбирання і запобігає тривалій експлуатації на неоптимальних режимах.

Контур верхнього рівня реалізує екстремальне керування з оптимізацією завдань приводу за критерієм максимізації чистого енергетичного ефекту, балансуючи між додатковою генерацією біометану в когенераторі та власними витратами електроенергії на обробку. Комплексна САК, що об'єднує терморегулювання циліндра (150–175 °C), коригування вологості (25–35 %), стабілізацію питомої механічної енергії SME та нейромережевий моніторинг шнека, забезпечує безаварійність обладнання і гарантує високу енергетичну рентабельність процесу підготовки субстрату.

Перелік джерел посилань

1. Witaszek K., Pilarski K., Niedbała G., Pilarska A. A., Herkowiak M. Energy Efficiency of Comminution and Extrusion of Maize Substrates Subjected to Methane Fermentation. *Energies*. 2020. Vol. 13, No. 8. P. 1906.

2. Durczak K., Witaszek K., Ekielski A., Żelaziński T. Leakage-Controlled Classification of Extrusion Screw Condition Using Wavelet and Deep Learning Methods. Processes. 2026. Vol. 14, Iss. 19. P. 3069.

3. Pilarski K., Pilarska A. A., Witaszek K., Dworecki Z., Żelaziński T., Ekielski A., Makowska A., Michniewicz J. The impact of extrusion on the biogas and biomethane yield of plant substrates. Journal of Ecological Engineering. 2016. Vol. 17, No. 4. P. 264–272.

4. Soja J., Oniszczuk T., Vaskina I., Combrzyński M., Wójtowicz A. Integration of Plant Pomace into Extruded Products: Analysis of Process Conditions, Post-Production Waste Properties and Biogas Potential. Energies. 2024. Vol. 17, No. 24. P. 6476.

УДК 004.8:636.09

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА РАННЬОЇ ДІАГНОСТИКИ ЗАХВОРЮВАНЬ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ ТВАРИН НА ОСНОВІ МЕТОДІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ

Мельник Д. О., аспірант; Кіктєв М. О., к.т.н., доцент

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

Раннє виявлення захворювань сільськогосподарських тварин є ключовим чинником біобезпеки, збереження продуктивності та зниження витрат на лікування. Традиційний ветеринарний моніторинг ґрунтується на періодичних оглядах і суб'єктивній оцінці стану тварин персоналом, тому хвороба часто фіксується вже після появи виражених клінічних ознак. Розвиток технологій точного тваринництва (Precision Livestock Farming) забезпечує безперервний збір даних про рухову активність, температуру тіла, споживання корму та води, надої й мікроклімат приміщень, що відкриває можливість переходу від реактивного до проактивного контролю здоров'я тварин [1, 3].

Аналіз публікацій свідчить, що методи машинного навчання успішно застосовуються для виявлення маститу, кульгавості та респіраторних захворювань великої рогатої худоби [2]. Водночас більшість існуючих рішень орієнтовані на один тип даних або одне захворювання, а їх широке впровадження стримують дисбаланс класів у навчальних вибірках, зашумленість сенсорних даних, індивідуальні відмінності між тваринами, недостатня зовнішня валідація моделей та низька інтерпретованість результатів для ветеринарного персоналу.

Метою роботи є обґрунтування архітектури інтелектуальної системи ранньої діагностики захворювань сільськогосподарських тварин, яка інтегрує різнорідні джерела даних і формує інтерпретовані попередження про ризик захворювання.

Запропонована система має модульну структуру та включає: підсистему збору даних з IoT-датчиків активності й температури, камер відеоспостереження, акустичних сенсорів, доїльного обладнання та ветеринарних журналів; модуль передобробки, що виконує очищення, синхронізацію за часом і нормалізацію даних відносно індивідуального базового профілю кожної тварини; модуль виявлення аномалій у часових рядах (Isolation Forest, автокодувальники, рекурентні нейронні мережі LSTM); модуль класифікації стану тварини на основі ансамблевих методів (Random Forest, Gradient Boosting); модуль раннього попередження, який оцінює рівень ризику, ранжує тварин за пріоритетом огляду та пояснює рішення за допомогою методів пояснюваного штучного інтелекту (SHAP).

Особливістю підходу є поєднання навчання без учителя для виявлення відхилень від індивідуальної норми з навчанням з учителем для ідентифікації конкретних захворювань, що дає змогу частково компенсувати нестачу розмічених даних. Для оцінювання ефективності, окрім точності, передбачено використання повноти, специфічності, F1-міри та критерію, що враховує різну вартість помилкових тривог і пропусків захворювання, оскільки за умов низької

поширеності хвороби загальна точність не відображає реальної якості системи. Досвід застосування методів обробки даних дистанційного моніторингу в агропромисловому комплексі [4] підтверджує доцільність такого підходу.

Подальші дослідження передбачають формування експериментального набору даних, навчання та порівняння моделей, а також апробацію програмного прототипу на базі проблемної науково-дослідної лабораторії «Інтелектуальні управляючі системи в АПК» НУБіП України. Очікується, що впровадження системи дозволить виявляти ознаки захворювань до появи явних клінічних симптомів і підвищить ефективність ветеринарного контролю.

Перелік джерел посилань

1. Neethirajan S. The role of sensors, big data and machine learning in modern animal farming. Sensing and Bio-Sensing Research. 2020. Vol. 29. 100367. https://doi.org/10.1016/j.sbsr.2020.100367

2. García R., Aguilar J., Toro M., Pinto A., Rodríguez P. A systematic literature review on the use of machine learning in precision livestock farming. Computers and Electronics in Agriculture. 2020. Vol. 179. 105826. https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105826

3. Berckmans D. General introduction to precision livestock farming. Animal Frontiers. 2017. Vol. 7, No. 1. P. 6–11. https://doi.org/10.2527/af.2017.0102

4. Кіктєв М. О., Градобоєв Д. А., Опришко О. О., Кармацьких А. А., Мельник Д. О. Ідентифікація локацій гризунів на полях для організації захисних заходів в агрономії. Енергетика і автоматика. 2025. № 2. С. 158–172. https://doi.org/10.31548/energiya2(78).2025.158

УДК 681.5:620.92

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АВТОМАТИЗОВАНИЙ КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРІВ АНАЕРОБНОГО ЗБРОДЖУВАННЯ СИРОВИНИ В ЛАБОРАТОРНИХ БІОГАЗОВИХ РЕАКТОРАХ

Племянник В. Р., здобувач вищої освіти; Дудник А. О., к.т.н., доцент

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна.

Ефективність біогазових технологій визначається рівнем енергетичних витрат на забезпечення стабільного технологічного циклу анаеробного зброджування та точністю контролю фізико-хімічних параметрів субстрату. Проведення лабораторних випробувань є базовим етапом оптимізації процесів метаногенезу, який охоплює детальний аналіз вихідних характеристик сировини, підготовку активного інокуляту та безперервний моніторинг об'єму утвореного біогазу.

На початковому етапі лабораторних досліджень проводиться комплексна оцінка фізико-хімічних показників органічної сировини. Зокрема, вимірюється вміст сухої маси (TS) та сухої органічної маси (VS), значення активної кислотності (pH), буферна ємність за співвідношенням летких жирних кислот до лужності (FOS/TAC), а також питома електропровідність (кондуктивність) середовища. Отримані значення дозволяють збалансувати співвідношення вуглецю та азоту (C/N), запобігти амонійній інгібіції та забезпечити оптимальне середовище для розвитку метаногенних мікроорганізмів [2].

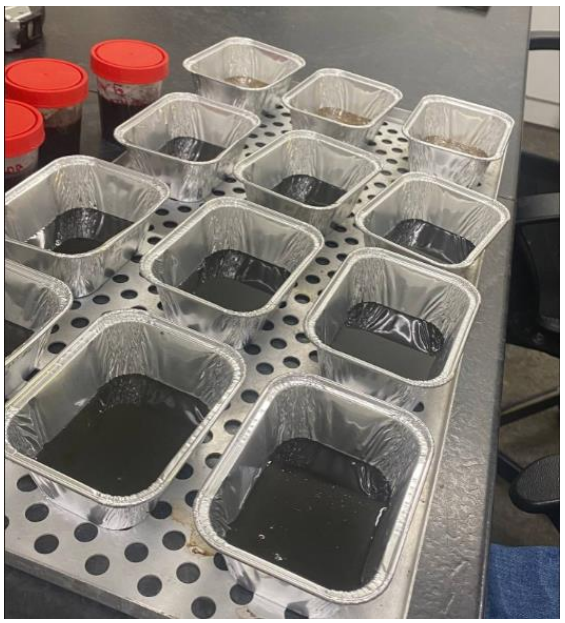


Рис. 1. Етап підготовки зразків до аналізу – розподіл зразків для паралельного визначення абсолютно сухої маси та екстракції сполук азоту

Для проведення ферментації використовуються герметичні лабораторні міні-реактори (скляні або полімерні ємності з затискачами), у які завантажується підготовлена суміш сировини та активного інокуляту. Відведення утвореного біогазу здійснюється через газовідвідні трубки у градуйовані вимірювальні туби, що дозволяє фіксувати добовий та кумулятивний вихід газу за допомогою методу витіснення рідини [2].



Рис. 2. Загальний вигляд експериментального стенда для ферментації – лабораторні біореактори з підключеною системою газовідвідних трубок та вимірювальних циліндрів для фіксації виходу біогазу

Підтримання однорідного стану субстрату та інтенсифікація тепломасообміну досягається шляхом механічного перемішування. Для

мінімізації споживання електроенергії приводом мішалки застосовується математичне моделювання на основі критеріїв гідродинамічної подоби Ейлера (Eu) та Рейнольдса (Re_m). Встановлено, що нелінійні залежності споживаної потужності від частоти обертання валу (n) описуються поліноміальними рівняннями 3-го та 4-го степенів [1]:

$$y = a_4x^4 + a_3x^3 + a_2x^2 + a_1x + a_0$$

де x – нормована частота обертів робочого органу мішалки;

y – величина споживаної потужності електроприводу. Розрахунки показують, що дволопатеві одноярусні мішалки з кутом встановлення лопатей 90° забезпечують найменші енерговитрати за номінальної частоти 40 об/хв порівняно з листовими та багатолопатевими конструкціями [1].

З метою автоматизації безконтактного контролю рівня та об'єму рідкого субстрату в закритих реакторах застосовуються ультразвукові датчики. Визначення часу прольоту акустичного сигналу (Time-of-Flight, TOF) здійснюється на основі статистичного критерію інформаційності Акаіке (AIC) [3]:

$$AIC(k) = k \cdot \ln\left[var\left(S(1,k)\right)\right] + (N-k-1) \cdot \ln\left[var(S(k=1,N))\right]$$

Застосування алгоритму AIC забезпечує точне визначення початку відбитого імпульсу в умовах температурних градієнтів та поверхневих коливань рідини, зменшуючи похибку вимірювання об'єму до залишків у межах ±0,3%, що переважає класичні амплітудно-порогові методи [3]. Для виключення кутових відхилень акустичної осі сенсора при монтуванні на лабораторні ємності використовується компенсація за даними акселерометра [4].

Таким чином, поєднання первинного лабораторного контролю якісних показників сировини, оптимізації періодичних режимів перемішування за критеріальними рівняннями та безконтактного ультразвукового вимірювання рівня забезпечує комплексну автоматизацію процесів анаеробного зброджування та підвищення чистого енергетичного балансу біогазових установок.

Перелік джерел посилань

1.Сподоба М. О., Сподоба О. О. Дослідження енерговитрат на перемішування сировини у біогазовому реакторі з використанням механічних мішалок. *Електротехніка та електроенергетика*. 2026. № 2. С. 50–58. DOI: 10.15588/1607-6761-2026-2-6.

2.Alrowais R., Abdel daiem M. M., Abo-bakr R. M., Elnokaly A., Said N., Metwally A. A. Enhancing Sustainable and Energy-Efficient Anaerobic Digestion of Animal Manure: Effects of Intermittent Stirring and ANN-Based Methane Production Modeling. *BioResources*. 2026. Vol. 21, No. 3. P. 6881–6915. DOI: 10.15376/biores.21.3.6881-6915.

3.Opieliński K. J., Świetlik T. Application of the Akaike Information Criterion to Ultrasonic Measurement of Liquid Volume in a Cylindrical Tank. *Sensors*. 2025. Vol. 25, No. 23. Art. 7191. DOI: 10.3390/s25237191.

4.Patel R., Bisht L., Kesavaraja C., Sengottuvel S. A feasibility study on non-contact liquid nitrogen level measurement in laboratory settings using machine learning-driven ultrasonic system. *International Journal of Information Technology*. 2025. Vol. 17. DOI: 10.1007/s41870-025-02568-z.

УДК 681.5.004

РЕАЛІЗАЦІЯ ВИМІРЮВАННЯ ВОЛОГОСТІ СИПУЧИХ КОМПОНЕНТІВ ПРЕМІКСІВ|

Правілов М.О., аспірант; Кіктєв М.О., к.т.н., доцент

Національний університет біоресурсів і природокористування України,м. Київ, Україна.

У виробництво премісів використовуються велика кількість сипких компонентів мінерального та органічного походження, фізичні властивості яких впливають на стабільність технологічного процесу та якість кінцевої продукції. Одним із важливих показників якості вхідної сировини є її вологість. Підвищений вміст вологи може спричиняти погіршення сипкості матеріалів, утворення комків, порушення процесів транспортування та дозування компонентів. Водночас традиційне візуальне оцінювання сировини не забезпечує кількісного визначення вологості та залежить від суб'єктивного сприйняття оператора. Тому актуальним завданням є розроблення технічних засобів автоматизованого вимірювання вологості сипких компонентів на етапі вхідного контролю [1].

Існує декілька методів для визначення вологості сипких матеріалів . До лабораторних належить гравіметричний метод, що ґрунтується на визначенні зміни маси зразка після його висушування до сталої маси. Наприклад, відповідно до стандарту ISO 2483:1973, для визначення конвенційного вмісту вологи у хлориді натрію промислового призначення застосовується висушування зразка за температури 110 ± 2 °C [2]. До інструментальних методів належать ємнісний, мікрохвильовий та інфрачервоний методи. Ємнісний метод базується на зміні діелектричних властивостей матеріалу залежно від вмісту вологи, мікрохвильовий — на аналізі взаємодії електромагнітного випромінювання з матеріалом, а інфрачервоний — на особливостях поглинання випромінювання молекулами води. Інструментальні методи забезпечують можливість оперативного та, у відповідних конструктивних виконаннях, безперервного контролю матеріалу [1, 3].

Вимірювання реалізується з використанням промислового датчику вологості сипких матеріалів з подальшим передаванням результатів до ПЛК (програмного логічного контролера). Як приклад такого обладнання можна розглянути ємнісний датчик ENVEA M-Sens WR3, призначений для вимірювання вологості пилоподібних, порошкоподібних та гранульованих матеріалів. Пристрій встановлюється у бункерах, контейнерах, шнекових і стрічкових транспортерах та підтримує передавання даних через аналоговий сигнал 4–20 мА і цифрові інтерфейси Modbus та Profibus [4]. Отримані дані можуть оброблятися контролером та передаватися на персональний комп'ютер для відображення, реєстрації й подальшого аналізу.

У запропонованій структурній схемі підсистеми першим етапом є відбір представницької проби сировини до її завантаження у приймальний бункер, розміщення зразка у вимірювальній камері та визначення його вологості за допомогою відповідного датчика. Сигнал датчика надходить до контролера, де

здійснюється його перетворення у фізичне значення вологості. Далі інформація передається на персональний комп'ютер, де результат порівнюється з установленими технологічними межами для відповідного виду сировини. За результатами контролю оператор отримує інформацію щодо можливості подальшого використання компонента або необхідності додаткової перевірки.

Для практичного використання запропонованої підсистеми потрібне калібрування вимірювального обладнання для конкретних видів сировини. Вплив насипної густини, гранулометричного складу та температури може спричиняти відмінності вимірювальних характеристик навіть для матеріалів з однаковим вмістом вологи [3]. Тому доцільно передбачити експериментальне порівняння показників промислового датчика з контрольним зразком.



Рис.1. Структурна схема запропонованої підсистеми автоматизованого вимірювання вологості сипких компонентів преміксів

Застосування запропонованої автоматизованої підсистеми вимірювання вологості дозволить доповнити візуальний контроль сировини об'єктивними кількісними показниками, зменшити вплив людського фактора та забезпечити накопичення інформації про якість партій компонентів. Описаний контур може бути використаний як складова системи автоматизованого контролю якості вхідної сировини у виробництві преміксів.

Перелік джерел посилань

1. Білинський Й. Й., Скалецька М. О. Аналіз методів та засобів вимірювання вологості сипких продуктів. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2023. № 2. С. 125–134. DOI: 10.31649/1997-9266-2023-167-2-125-134.

2. ISO 2483:1973. Sodium chloride for industrial use — Determination of the loss of mass at 110 degrees C. International Organization for Standardization.

3. Zabolotnyi O., Koshevoi M. An effective method of bulk materials moisture measurement using capacitive sensors. *Journal of Stored Products Research*. 2020. Vol. 89. Article 101733. DOI: 10.1016/j.jspr.2020.101733.

УДК 628.1:681.5

МОДЕЛЮВАННЯ ТА УДОСКОНАЛЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ВОДОПОСТАЧАННЯМ НА ОСНОВІ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ АВТОМАТИЗАЦІЇ

Стеценко С. Ю., студентка; Дудник А.О., к.т.н., доцент

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

Сучасні системи водопостачання є важливими об’єктами інженерної інфраструктури, функціонування яких безпосередньо залежить від надійності насосного обладнання та ефективності систем автоматизованого керування. Однією з основних проблем експлуатації насосних станцій є забезпечення стабільних параметрів подачі води за умов змінного водоспоживання, зниження енергетичних витрат та запобігання аварійним режимам роботи. Це зумовлює актуальність розроблення й удосконалення автоматизованих систем керування технологічними процесами водопостачання [1, 2].

Перспективним напрямом вирішення зазначених завдань є застосування сучасних засобів автоматизації, математичного моделювання та цифрових технологій. Використання програмованих логічних контролерів, датчиків тиску, рівня та витрати води, а також систем диспетчерського керування та збору даних (SCADA) дає змогу забезпечити безперервний контроль технологічних параметрів і своєчасне реагування на зміну режимів роботи обладнання. Особливого значення набуває автоматичне регулювання продуктивності насосних агрегатів відповідно до потреб водоспоживання [2, 3].

У межах дослідження автоматизованої системи водопостачання КП «Зеленодольський міський водоканал» розглянуто особливості функціонування насосного обладнання артезіанських свердловин. Основою системи є насосний агрегат К45/30, робота якого характеризується необхідністю забезпечення заданих параметрів подачі води та стабільності технологічного процесу. Для дослідження динамічних характеристик системи та оцінювання якості регулювання застосовано математичне моделювання в середовищі MATLAB Simulink.

Розроблення математичної моделі автоматизованої системи керування дає змогу дослідити перехідні процеси, визначити вплив параметрів регулятора на динаміку системи та оцінити її стійкість. Важливими показниками якості автоматичного регулювання є час перехідного процесу, величина перерегулювання, статична похибка та запаси стійкості. Комплексне оцінювання зазначених характеристик дає змогу обґрунтувати вибір параметрів системи керування та забезпечити її стабільне функціонування в заданих режимах.

За результатами моделювання автоматизованої системи керування отримано такі показники якості регулювання: час регулювання — 0,34 с, статична похибка — 0 %, перерегулювання — 4 %. Запас за фазою становить 61,4°, а запас за амплітудою — 9,9 дБ. Отримані характеристики свідчать про

забезпечення стійкості системи та належної якості перехідного процесу в межах досліджуваної математичної моделі.

Подальший розвиток автоматизованих систем водопостачання пов’язаний із впровадженням інтелектуальних алгоритмів аналізу технологічних даних, прогнозування водоспоживання та оптимізації режимів роботи насосних агрегатів. Зокрема, методи машинного навчання можуть застосовуватися для прогнозування зміни потреби у воді, виявлення нетипових режимів роботи обладнання та формування рекомендацій щодо оптимального керування насосами. Наукові дослідження підтверджують перспективність поєднання математичних моделей гідравлічних систем з алгоритмами штучного інтелекту для підвищення енергоефективності насосних станцій [1].

Таким чином, застосування сучасних технологій автоматизації та математичного моделювання є важливим інструментом підвищення ефективності систем водопостачання. Результати дослідження автоматизованої системи керування КП «Зеленодольський міський водоканал» підтверджують доцільність використання моделювання для оцінювання динамічних характеристик і стійкості системи. Перспективним напрямом подальших досліджень є інтеграція інтелектуальних алгоритмів у системи автоматизованого керування насосним обладнанням з метою підвищення надійності, енергоефективності та адаптивності технологічного процесу водопостачання.

Перелік джерел посилань

1. Pump Scheduling Optimization in Urban Water Supply Stations: A Physics-Informed Multiagent Deep Reinforcement Learning Approach // Mathematical Problems in Engineering. 2024. DOI: https://doi.org/10.1155/2024/9557596

2. Zamikhovskyi L., Nykolaychuk M., Levytskyi I. Organizing the automated system of dispatch control over pump units at water pumping stations // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2024. DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.313531

3. Ткачук А. Ф., Мошноріз М. М. Оптимізація енергоспоживання електроприводів насосних станцій у розподілених системах водопостачання з використанням SCADA. Вінницький національний технічний університет, 2025. URL: https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/47762

УДК 681.51:628.8:631.234:620.9

БАГАТОРІВНЕВА АРХІТЕКТУРА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО КЕРУВАННЯ МІКРОКЛІМАТОМ ПРОМИСЛОВИХ ТЕПЛИЦЬ

Якименко І. Ю., доктор філософії (PhD)

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

Промислова теплиця є нелінійним нестаціонарним об’єктом автоматичного керування, на який впливають температура та вологість зовнішнього повітря, сонячне випромінювання й режими роботи технологічного обладнання. Застосування лише локальних контурів стабілізації не забезпечує узгодженої мінімізації енергоспоживання. Метою роботи є моделювання

багаторівневої інтелектуальної системи керування мікрокліматом, яка поєднує прогнозування енерговитрат, вибір режимів обладнання та адаптацію параметрів регуляторів [1–3].

Для дослідження сформовано структурно-логічну модель системи (рис. 1). На рівні вимірювання збирають дані про температуру й відносну вологість повітря всередині та зовні теплиці, сонячне випромінювання і параметри енергоспоживання. На верхньому рівні нейромережева модель формує прогноз витрат енергоносіїв. Нейронечітка експертна система за сукупністю виміряних і прогнозованих даних визначає режими роботи опалення та вентиляції з урахуванням технологічних вимог [1].

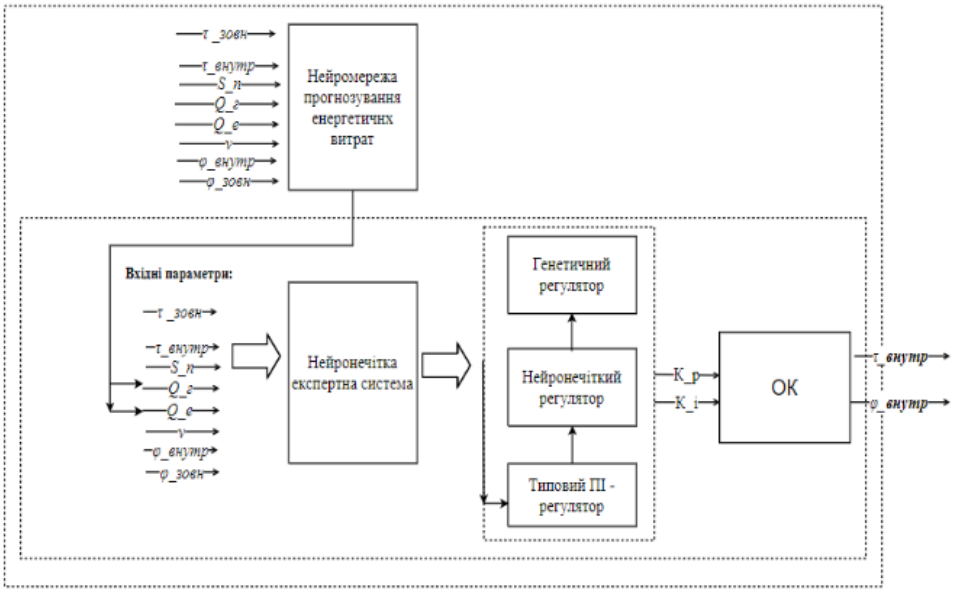


Рис. 1. Структурно-логічна схема інтелектуальної системи керування мікрокліматом

На рівні локального регулювання використано ПІ-регулятори температурно-вологісного режиму. Для адаптації їхніх параметрів до змінних характеристик об’єкта розглянуто нечіткий висновок і генетичний алгоритм. Моделювання перехідних процесів виконано в MATLAB/Simulink; оцінювали перерегулювання та час встановлення регульованої величини. Така побудова забезпечує інформаційний зв’язок між прогнозуванням, прийняттям рішень та виконавчим обладнанням [1, 4].

За результатами моделювання налаштування ПІ-регулятора генетичним алгоритмом забезпечило перерегулювання 1,5 % і час встановлення 6500 с; для традиційного методу відповідні показники становили 28 % і 20 000 с [1]. Отже, перерегулювання зменшилося на 26,5 відсоткового пункту, а час встановлення — приблизно у 3,1 раза. Оцінювання енергоефективних режимів комплексної системи показало можливість скорочення витрат природного газу до 13 %, електроенергії — до 10 % [1].

Таким чином, моделювання підтвердило доцільність узгодження нейромережевого прогнозування, нейронечіткого вибору режимів обладнання й адаптивного ПІ-регулювання. Запропонована архітектура дає змогу підвищити

якість перехідних процесів та формувати енергоощадні керувальні дії за змінних зовнішніх умов.

Перелік джерел посилань

1. Dudnyk A., Pasichnyk N., Yakymenko I., Lendiel T., Witaszek K., Durczak K., Czekała W. Smart Resource Management and Energy-Efficient Regimes for Greenhouse Vegetable Production. Energies. 2025. Vol. 18, No. 17. Art. 4690. https://doi.org/10.3390/en18174690
2. Lee M.-H., Yao M.-H., Kow P.-Y., Kuo B.-J., Chang F.-J. An Artificial Intelligence-Powered Environmental Control System for Resilient and Efficient Greenhouse Farming. Sustainability. 2024. Vol. 16. Art. 10958. https://doi.org/10.3390/su162410958
3. Nicolosi G., Volpe R., Messineo A. An Innovative Adaptive Control System to Regulate Microclimatic Conditions in a Greenhouse. Energies. 2017. Vol. 10. Art. 722. https://doi.org/10.3390/en10050722
4. Robles Algarín C., Callejas Cabarcas J., Polo Llanos A. Low-Cost Fuzzy Logic Control for Greenhouse Environments with Web Monitoring. Electronics. 2017. Vol. 6. Art. 71. https://doi.org/10.3390/electronics6040071

СЕКЦІЯ 5
ІСТОРІЯ ТА ФІЛОСОФІЯ НАУКИ І ТЕХНІКИ. МЕТОДОЛОГІЯ ВИЩОЇ ТЕХНІЧНОЇ ОСВІТИ

УДК 378.147:517.37:621.311

ПОДВІЙНІ ІНТЕГРАЛИ ЯК ІНСТРУМЕНТ ПЕРЕВІРКИ РОЗРАХУНКІВ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В ЗАДАЧАХ ЕНЕРГЕТИКИ

Гай Г. А., к. пед. н., доцент; Бородійчук Н. О., студент

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

Штучний інтелект (ШІ) дедалі ширше застосовують в енергетиці - від прогнозування генерації до керування мережами. Огляд моделей енергосистем [1] розрізняє класичні математичні підходи (динамічні системи, стохастичні рівняння) та моделі на основі ШІ, які точніші в короткостроковому прогнозуванні, проте менш пояснювані. Відповідь такої моделі не можна приймати без перевірки її відповідності фізичній постановці задачі, тому інженер-енергетик має володіти математичним апаратом, який дозволяє відтворити й проконтролювати розрахунок. Для величин, що накопичуються по площі, таких як маса, заряд, магнітний потік чи потужність панелі, цим апаратом є подвійний інтеграл; водночас правильно обчислений інтеграл ще не гарантує коректності інженерного висновку.

Мета роботи - систематизувати ті властивості подвійного інтеграла, які утворюють схему перевірки розрахунку, та проілюструвати цю схему на задачі про масу пластини. Розробка має теоретико-методичний характер; її навчальну ефективність експериментально не оцінювали.

Подвійний інтеграл функції $\mu(x, y)$ по обмеженій замкненій області D означають як границю інтегральних сум: область розбивають на частини, у кожній обирають точку, складають суму добутків значень функції на площі частин і спрямовують діаметри частин до нуля; для неперервної на D функції ця границя існує [2]. Якщо $\mu \geq 0$ - поверхнева густина, інтеграл дорівнює масі пластини D; заміна густини маси густиною заряду або опроміненості змінює лише одиниці та інтерпретацію результату, а не спосіб обчислення. Практично подвійний інтеграл обчислюють зведенням до повторного: для області, правильної в напрямі осі Oy, тобто $D = \{(x, y): a \leq x \leq b,\ g_1(x) \leq y \leq g_2(x)\}$, справджується рівність [2]

$$\iint_D \mu \, dA = \int_a^b \left(\int_{g_1(x)}^{g_2(x)} \mu\,(x, y)\, dy \right) dx.$$

Для контролю результату важливі такі властивості [2]: лінійність та адитивність за областю; монотонність, з якої випливає оцінка $m_0 S \leq \iint_D \mu \, dA \leq M_0 S$, де S - площа області, m_0 і M_0 - найменше та найбільше значення густини на D; теорема про середнє значення, за якою інтеграл дорівнює $\mu(x_0, y_0)\, S$ для деякої точки $(x_0, y_0) \in D$. Звідси випливає алгоритм перевірки будь-якого розрахунку, зокрема запропонованого ШІ: обґрунтувати підінтегральну

величину й межі області; виконати обчислення; переконатися, що знак, одиниці та числове значення відповіді узгоджуються з наведеними оцінками.

Задача [3, с. 11-12]. Пластина D обмежена лініями $y = 2x - x^2$ і $y = x$; поверхнева густина $\mu(x, y) = x^2 + 2xy$ (у нормованих одиницях). Знайти масу пластини та перевірити результат.

Розв'язання. Лінії перетинаються в точках $x = 0$ і $x = 1$, причому на відрізку $[0; 1]$ виконується нерівність $2x - x^2 \geq x$, тож область правильна в напрямі осі Oy і

$$m = \iint_D \mu \, dA = \int_0^1 dx \int_x^{2x-x^2} (x^2 + 2xy)\, dy = \int_0^1 (4x^3 - 5x^4 + x^5)\, dx = \frac{1}{6}.$$

Перевірка. Площа області $S = \int_0^1 (2x - x^2 - x)\, dx = \frac{1}{6}$. Густина на D невід'ємна і не перевищує $\mu(1; 1) = 3$, тому оцінка дає $0 \leq m \leq 3S = \frac{1}{2}$, і значення $\frac{1}{6}$ їй задовольняє. Середня густина $\bar{\mu} = m/S = 1$ лежить між найменшим і найбільшим значеннями, що узгоджується з теоремою про середнє. Перестановка меж інтегрування за y змінила б знак результату, і від'ємна маса одразу сигналізувала б про помилку в описі області; у розмірних змінних добуток густини (кг/м^2) на площу (м^2) дає кілограми, отже одиниці результату узгоджені.

Саме така схема перетворює подвійний інтеграл на робочий інструмент перевірки: відповідь, отриману від моделі ШІ або з довідкових даних, порівнюють не лише з власним обчисленням, а й зі знаком, одиницями та оцінками, які випливають із властивостей інтеграла. Студент, який послідовно виконує ці кроки, виявляє помилкову область інтегрування чи неправдоподібне числове значення без звернення до сторонніх засобів.

Висновки. Властивості подвійного інтеграла - оцінка через найменше та найбільше значення густини, теорема про середнє, адитивність - утворюють природну систему контролю інженерного розрахунку. Опанування цієї системи робить математику не лише засобом обчислення, а й критерієм довіри до результатів, зокрема отриманих за допомогою ШІ в задачах енергетики [1].

Перелік джерел посилань

1. Srinivasan S., Kumarasamy S., Andreadakis Z. E., Lind P. G. Artificial intelligence and mathematical models of power grids driven by renewable energy sources: a survey. *Energies*. 2023. Vol. 16, No. 14. Art. 5383. DOI: 10.3390/en16145383.

2. Strang G., Herman E. *Calculus Volume 3*. Houston: OpenStax, 2016. Ch. 5. URL: https://openstax.org/books/calculus-volume-3/pages/5-2-double-integrals-over-general-regions.

3. Ламтюгова С. М., Ситникова Ю. В. *Вища математика. Модуль 3*: методичні рекомендації до практичних занять та самостійної роботи для здобувачів ступеня бакалавра спеціальності 185 «Нафтогазова інженерія та технології». Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2023.

УДК 378.147:519.2:621.548

МАТЕМАТИЧНА СТАТИСТИКА У ВІТРОЕНЕРГЕТИЦІ: ВІД ВИБІРКОВОГО СЕРЕДНЬОГО ДО ПОТУЖНОСТІ ВІТРУ

Гай Г. А., к. пед. н., доцент; Кравець О. В., студент

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

Світова енергетика переживає період рекордного зростання вітрової та сонячної генерації. За даними Міжнародного агентства з відновлюваної енергії (IRENA), наприкінці 2025 року сумарна потужність відновлюваних джерел досягла 5149 ГВт; за рік уведено 692 ГВт (зростання на 15,5 %), що становить 85,6 % усього приросту потужностей, причому на сонячну й вітрову енергетику припало 96,8 % приросту відновлюваних [1]. Вихідна потужність таких установок залежить від погоди, тому її оцінювання неможливе без статистичного опису швидкості вітру за вибіркою вимірювань. Отже, сучасний енергетик має вміти оцінювати параметри розподілу за вибіркою, перевіряти придатність моделі та розуміти похибки результатів.

Мета роботи - систематизувати ймовірнісно-статистичні поняття, на яких ґрунтується оцінювання вітрового ресурсу, та проілюструвати їх на задачі з підручника [3].

Швидкість вітру в заданій точці розглядають як неперервну випадкову величину V зі щільністю розподілу $f(v)$. Її числовими характеристиками є початкові моменти $\nu_k = E[V^k] = \int_0^\infty v^k\, f(v)\, dv$, зокрема математичне сподівання $\mu = \nu_1$, та центральні моменти, зокрема дисперсія $\sigma^2 = E[(V-\mu)^2] = \nu_2 - \mu^2$. Питома потужність вітрового потоку $p = \frac{1}{2}\rho v^3$ залежить від швидкості нелінійно, тому її середнє значення визначається третім початковим моментом: $\bar{p} = \frac{1}{2}\rho\, E[V^3]$. Подавши $V = \mu + (V-\mu)$ і розкривши куб суми, дістаємо розклад

$$E[V^3] = \mu^3 + 3\mu\sigma^2 + \mu_3,$$

де $\mu_3 = E[(V-\mu)^3]$ - третій центральний момент, який характеризує асиметрію розподілу. Звідси видно, що за симетричного розподілу ($\mu_3 = 0$) середня потужність перевищує $\frac{1}{2}\rho\mu^3$ рівно на величину, пропорційну дисперсії, тож підстановка середньої швидкості в формулу потужності завжди занижує результат.

У вітроенергетиці стандартною моделлю є розподіл Вейбулла зі щільністю $f(v) = \frac{k}{c}\left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-(v/c)^k}$, параметри якого оцінюють за вибіркою методом максимальної правдоподібності, найменших квадратів або моментів; жоден розподіл не підходить для всіх майданчиків, тому придатність моделі щоразу перевіряють за даними конкретного місця [2]. Для розподілу Вейбулла $E[V] = c\,\Gamma(1+1/k)$ і $E[V^3] = c^3\,\Gamma(1+3/k)$ [3]. В окремому випадку розподілу Релея ($k = 2$) відношення моментів має аналітичний вигляд [3]:

$$\frac{E[V^3]}{(E[V])^3} = \frac{\Gamma(5/2)}{\Gamma^3(3/2)} = \frac{6}{\pi} \approx 1{,}91,$$

тобто справжня середня потужність майже вдвічі більша за обчислену через середню швидкість.

Задача [3, розд. 6, приклад 6.1]. Густина повітря $\rho = 1{,}225$ кг/м^3 (15°C, 1 атм). Порівняти енергію вітру, що проходить через 1 м^2 площі, перпендикулярної потоку, за два режими тривалістю по 100 год: а) сталий вітер 6 м/с; б) 50 год при 3 м/с і 50 год при 9 м/с. Середня швидкість в обох режимах однакова.

Розв'язання. Режим б) подамо як випадкову величину V з розподілом $P(V = 3) = P(V = 9) = 1/2$ (частки часу). Тоді $\mu = 6$ м/с, $\sigma^2 = 1/2\,[(3-6)^2 + (9-6)^2] = 9$ м^2/с^2, $\mu_3 = 1/2\,[(-3)^3 + 3^3] = 0$. Режим а) дає $W_a = 1/2\,\rho \cdot 6^3 \cdot 100 \approx 13\,230$ Вт·год. Для режиму б)

$$E[V^3] = 1/2\,(3^3 + 9^3) = 378 \text{ м}^3/\text{с}^3, \qquad W_b = 1/2\,\rho\,E[V^3] \cdot 100 \approx 23\,152 \text{ Вт} \cdot \text{год}.$$

Перевірка. Розклад через центральні моменти дає те саме значення: $\mu^3 + 3\mu\sigma^2 + \mu_3 = 216 + 3 \cdot 6 \cdot 9 + 0 = 378$, отже обчислення узгоджені. Контроль одиниць: добуток кг/м^3 на м^3/с^3 дає кг/с^3, тобто Вт/м^2, а множення на час - Вт·год з розрахунку на 1 м^2. Відношення $W_b/W_a = 378/216 = 1{,}75$: за однакової середньої швидкості режим зі змінним вітром дає на 75 % більше енергії, і весь надлишок породжений дисперсією швидкості.

Висновки. Середнє значення швидкості вітру не є достатньою характеристикою вітрового ресурсу: середня потужність визначається третім моментом розподілу, до якого входить дисперсія. Математична статистика дає енергетику послідовний апарат - від вибірки вимірювань через оцінювання параметрів розподілу до енергетичних показників і перевірки їхньої правдоподібності, а швидке зростання відновлюваної енергетики [1] лише підсилює значення таких оцінок.

Перелік джерел посилань

1. IRENA. Renewable Capacity Statistics 2026. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2026.

2. Shi H., Dong Z., Xiao N., Huang Q. Wind speed distributions used in wind energy assessment: a review. *Frontiers in Energy Research*. 2021. Vol. 9. P. 769920. DOI: 10.3389/fenrg.2021.769920.

3. Masters G. M. Renewable and Efficient Electric Power Systems. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2004. ISBN 0-471-28060-7. Ch. 6.

УДК 378.147:519.2:621.311

ТЕОРІЯ ЙМОВІРНОСТЕЙ У ПІДГОТОВЦІ ЕНЕРГЕТИКА В ЕПОХУ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ: ОЦІНЮВАННЯ НАДІЙНОСТІ ГЕНЕРУЮЧОЇ СИСТЕМИ

Гай Г. А., к. пед. н., доцент; Тіяра Д. В., студент

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

Сучасна енергетика дедалі більше залежить від величин, які неможливо визначити точно: погоди, споживання, відмов обладнання. Зі зростанням частки відновлюваних джерел зростає невизначеність генерації, тому для планування та експлуатації енергосистем ймовірнісні прогнози набувають більшого значення, ніж точкові [1]. Додатковим чинником є стрімкий розвиток штучного інтелекту (ШІ): за оцінкою Міжнародного енергетичного агентства (МЕА), центри обробки даних 2025 року спожили 485 ТВт·год, а найбільшою перешкодою для впровадження ШІ в енергетиці визнано брак цифрових навичок [2]. За даними Всесвітнього економічного форуму, роботодавці очікують найшвидшого зростання потреби в навичках ШІ та великих даних [3].

З цього випливають вимоги до енергетика майбутнього: поєднання знань про електричні системи з умінням кількісно описувати невизначеність, оцінювати надійність і інтерпретувати результати моделей ШІ. Математичні моделі енергосистем із відновлюваними джерелами спираються, зокрема, на стохастичні диференціальні рівняння та байєсів висновок, тоді як моделі на основі ШІ частіше точніші в короткостроковому прогнозуванні, проте менш пояснювані [4]. Правильне тлумачення ймовірності, довірчого інтервалу чи оцінки ризику, які видає така модель, потребує знання теорії ймовірностей. Отже, вона є основою інженерного мислення в умовах невизначеності.

Мета роботи - показати застосування теорії ймовірностей до оцінювання надійності генеруючої системи на прикладі, наведеному в [5].

Задача. Генеруюча система складається з двох незалежних агрегатів: 80 МВт з коефіцієнтом вимушеного простою $q_1 = 0{,}06$ (пріоритет навантаження 1) і 60 МВт з $q_2 = 0{,}03$ (пріоритет 2). Графік тривалості навантаження - пряма від 160 до 80 МВт, тривалість періоду $T = 100$ год [5, розд. 4.2]. Знайти очікувану недовідпущену енергію, енергію, відпущену кожним агрегатом, та індекс надійності за енергією EIR.

Розв'язання. Через незалежність агрегатів ймовірності станів системи дорівнюють добуткам ймовірностей станів агрегатів:

$$P(140) = 0{,}94 \cdot 0{,}97 = 0{,}9118, \quad P(80) = 0{,}94 \cdot 0{,}03 = 0{,}0282, \quad P(60) = 0{,}06 \cdot 0{,}97 = 0{,}0582, \quad P(0) = 0{,}06 \cdot 0{,}03 = 0{,}0018.$$

Навантаження змінюється за законом $L(t) = 160 - 0{,}8t$ (МВт). Недовідпущена енергія за наявної потужності C становить

$E_C = \int_0^T \max\left(L(t) - C,\, 0\right)dt$, звідки $E_{140} = 250$, $E_{80} = 4000$, $E_{60} = 6000$, $E_0 = 12000$ МВт·год.

За формулою повної ймовірності

$$\varepsilon ENS = \sum_C P\,(C)\,E_C = 0{,}9118 \cdot 250 + 0{,}0282 \cdot 4000 + 0{,}0582 \cdot 6000 +$$

$$0{,}0018 \cdot 12000 = 711{,}55 \text{ МВт·год},$$

що збігається зі значенням у [5]. Повний попит $TED = \int_0^T L\,(t)\,dt = 12000$ МВт·год, тому $EIR = 1 - \frac{711{,}55}{12000} \approx 0{,}941$. Після підключення лише першого агрегата очікувана недовідпущена енергія становить $0{,}06 \cdot 12000 + 0{,}94 \cdot 4000 = 4480$ МВт·год, тож перший агрегат відпускає $12000 - 4480 = 7520$ МВт·год, а другий - $4480 - 711{,}55 = 3768{,}45$ МВт·год. Отже, близько 5,9 % енергії залишається недовідпущеною, а внесок другого агрегата кількісно показує ефект резервування.

Висновки. Невизначеність генерації та споживання, а також поширення ШІ [1-4] роблять теорію ймовірностей базовим інструментом енергетика. На прикладі з [5] показано, що правила множення ймовірностей незалежних подій і формула повної ймовірності дають змогу оцінити надійність генеруючої системи в енергетичних одиницях.

Перелік джерел посилань

1. Hong T., Fan S. Probabilistic electric load forecasting: a tutorial review. *International Journal of Forecasting*. 2016. Vol. 32, No. 3. P. 914-938. DOI: 10.1016/j.ijforecast.2015.11.011.
2. International Energy Agency. Key questions on energy and AI. Paris: IEA, 2026. URL: https://www.iea.org/reports/key-questions-on-energy-and-ai.
3. World Economic Forum. The Future of Jobs Report 2025. Geneva: WEF, 2025. URL: https://www.weforum.org/publications/the-future-of-jobs-report-2025/.
4. Srinivasan S., Kumarasamy S., Andreadakis Z. E., Lind P. G. Artificial intelligence and mathematical models of power grids driven by renewable energy sources: a survey. *Energies*. 2023. Vol. 16, No. 14. Art. 5383. DOI: 10.3390/en16145383.
5. Al-Shaalan A. M. Reliability evaluation of power systems. In: *Reliability and Maintenance - An Overview of Cases*. London: IntechOpen, 2019. DOI: 10.5772/intechopen.85571.

УДК 378.147.091.3:621.3

ВІД ГРАФІКА ДО ОСЦИЛОГРАМИ: ПОСЛІДОВНІСТЬ ВИВЧЕННЯ СИНУСОЇДАЛЬНОГО СИГНАЛУ В ІНЖЕНЕРНІЙ ПІДГОТОВЦІ

Грудинін Б. О., д. пед. н., доцент; Мейш Ю. А., д. техн. н., професор, Гай Г. А., канд. пед. н., доцент

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

Синусоїдальний сигнал є базовою моделлю електротехніки: так описують напругу мережі, струм у колах змінного струму, вихід генератора чи інвертора, тож від володіння його параметрами залежить подальше вивчення кіл і перетворювачів [1]. Проте студенти базового курсу теорії кіл нерідко застосовують формули механічно, не пов’язуючи їх із фізичним процесом.

Ускладнює тему те, що той самий сигнал постає в кількох формах: графік, тригонометрична функція, обертовий вектор, осцилограма, показ мультиметра. За даними метааналізу [2], кілька представлень покращують засвоєння, коли учні

вміють переходити між ними, а модель DeFT [3] вимагає організовувати такі переходи цілеспрямовано.

Мета роботи – запропонувати послідовність навчальних дій, що пов’язує графічне, математичне та інструментальне подання синусоїдального сигналу, і показати її на наскрізному прикладі.

Пропонована послідовність охоплює сім кроків: 1) де інженер має справу із синусоїдою; 2) параметри за графіком; 3) обертовий радіус-вектор і рівняння; 4) фазові співвідношення; 5) вимірювання генератором і осцилографом [4]; 6) середнє й діюче значення; 7) перевірка прогнозу моделюванням. До амплітуди, періоду й фази студент повертається кілька разів, щоразу в новому контексті.

Центральною є модель

$$x(t) = X_0 + X_m \sin(\omega t + \varphi_0), \qquad \omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T},$$

де X_0 – постійна складова, X_m – амплітуда, ω – кутова частота, φ_0 – початкова фаза. Кожен параметр має графічний відповідник: X_m – відстань від середньої лінії до піка, T – відстань між однаковими фазовими точками, X_0 – зміщення середньої лінії, φ_0 – зсув графіка вздовж осі часу.

Наскрізний приклад. На екрані осцилографа (рис. 1) від середньої лінії до піка напруги – 3 поділки за чутливості 2 В/под., а період займає 4 поділки за розгортки 5 мс/под. Тоді

$$U_m = n_y k_y = 6 \text{ В}, \qquad T = n_x k_x = 20 \text{ мс},$$

$$f = 50 \text{ Гц} \;\Rightarrow\; u(t) = 6\sin(314\,t) \text{ В}.$$

Струм у другому каналі відстає на $\Delta t = 2{,}5$ мс, тому фазовий зсув $\varphi = 360^\circ \cdot \Delta t / T = 45^\circ$. Діюче значення $U = U_m/\sqrt{2} \approx 4{,}24$ В – саме його покаже мультиметр, тоді як осцилограф дає амплітуду 6 В і розмах 12 В. Пояснення, чому прилади показують різні числа, переводить формулу в інженерну площину; так само за діючою напругою мережі 230 В студент знаходить амплітуду ≈ 325 В.

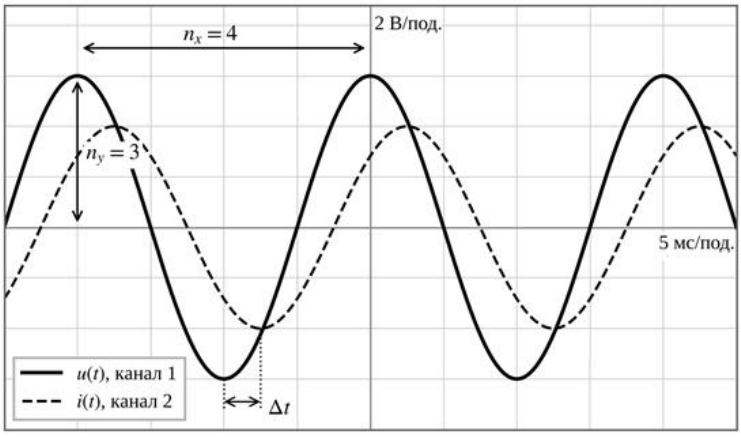


Рис. 1. Визначення параметрів сигналів за двоканальною осцилограмою

На завершальному кроці студент формулює прогноз, а потім у Multisim або PSpice змінює по одному параметру й зіставляє результат із розрахунком та осцилограмою. Віртуальні засоби, зокрема вебінтерфейси осцилографа, зручні для підготовки до лабораторної роботи та повторного аналізу [5], але не замінюють реального вимірювання: найкращі результати дає поєднання фізичного й віртуального експерименту.

Отже, вивчення синусоїдального сигналу доцільно будувати як ланцюжок переходів між його поданнями: графік – рівняння – осцилограма – розрахунок – модель. Наскрізний приклад показує студентові, що всі ці форми описують той самий фізичний процес. Подальша робота – апробація послідовності на практичних і лабораторних заняттях.

Перелік джерел посилань

1. Костюков І. О., Кубрик Б. І., Кропачек О. Ю., Литвиненко С. А., Лавріненко О. В. Лінійні електричні кола постійного, однофазного синусоїдного та трифазного живлення : навч.-метод. посіб. Харків : НТУ «ХПІ», 2025. 160 с.

2. Rexigel E., Kuhn J., Becker S., Malone S. The More the Better? A Systematic Review and Meta-Analysis of the Benefits of More than Two External Representations in STEM Education. Educational Psychology Review. 2024. Vol. 36. Art. 124. DOI: 10.1007/s10648-024-09958-y.

3. Ainsworth S. DeFT: A Conceptual Framework for Considering Learning with Multiple Representations. Learning and Instruction. 2006. Vol. 16, No. 3. P. 183–198. DOI: 10.1016/j.learninstruc.2006.03.001.

4. Електротехніка. Лінійні електричні кола постійного струму. Лінійні електричні кола синусоїдного струму : лаб. практикум : навч. посіб. / уклад.: Л. Ю. Спінул та ін. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2026. 111 с.

5. Павловська Н., Павловський Ю. Особливості вивчення основ електротехніки на заняттях з технологій в умовах дистанційного навчання. Український педагогічний журнал. 2023. № 1. С. 133–140. DOI: 10.32405/2411-1317-2023-1-133-140.

УДК 378.147.091.3:621.3

ОСОБЛИВОСТІ ПРОВЕДЕННЯ БЕЗКОШТОВНИХ КУРСІВ З ФІЗИКИ ДЛЯ СТУДЕНТІВ ПЕРШОГО КУРСУ БАКАЛАВРАТУ

***|Грудинін Б. О., д. пед. н., доцент*;**

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна.

В НУБіП України традиційно проведено безкоштовні курси для здобувачів освіти першого курсу за освітнім ступенем «Бакалавр» з фундаментальних дисциплін (фізики, математики, хімії, біології – курси вирівнювання).

Мета курсів – допомога окремій категорії першокурсників отримати базові знання з фундаментальних дисциплін, що уможливить ефективне опанування ними освітніми компонентами, передбаченими відповідними освітніми програмами.

На початку 2026/2027 навчального року за наказом ректора НУБіП України № 890 від 5.09.2026 р. «Про проведення зрізу знань вступників 2026 року – студентів 1 курсу для студентів першого курсу бакалаврату з профільних та природничих дисциплін» кафедрою фізики навчально-наукового інституту

енергетики, автоматики і енергозбереження НУБіП України було проведено зріз знань студентів першого курсу бакалаврату за допомогою гул-форми, розробленої науково-педагогічними працівниками (НПП) кафедри.

За результатами проходження анкетування були відібрані ті першокурсники, які набрали половину і менше від максимальної кількості балів, передбачених анкетуванням. Так, в анкетуванні брало участь 974 здобувачів освіти першого курсу повного терміну навчання усіх спеціальностей університету, з яких не подолали прохідний поріг 266 студенти (27%). Від навчально-наукового інституту енергетики, автоматики і енергозбереження НУБіП України брало участь в анкетуванні 85 здобувачів освіти, з яких 57 особи (55 %) не подолали 50% бар'єр балів (1 ст. на ОПП «Теплоенергетика», 28 ст. на ОПП «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» (ЕЕЕ), 17 ст. на ОПП «Інжиніринг електроенергетичних систем з відновлювальними джерелами» (ІЕС), 11 ст. на ОПП «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» (АКІТ) повного терміну навчання.

За результатами проведеного моніторингу організовано роботу НПП кафедри фізики зі здобувачами освіти зазначеної категорії на курсах вирівнювання з метою формування в них базових знань з фізики. Курси проходили у відповідності до затвердженої програми протягом 5 тижнів (20 аудиторних годин – 4 години на тиждень); задіяно 8 НПП кафедри фізики. Усі заняття проведено в очному форматі.

Після завершення курсів НПП кафедри фізики повторно провели зріз знань. За результатами моніторингу з'ясовано, що зі 266 здобувачів освіти всіх спеціальностей університету подолали 50% бар'єр 219 здобувача освіти (82%), з яких 47 (21 %) – здобувачі освіти навчально-наукового інституту енергетики, автоматики і енергозбереження НУБіП України (1 ст. на ОПП «Теплоенергетика», 24 ст. на ОПП «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» (ЕЕЕ), 14 ст. на ОПП «Інжиніринг електроенергетичних систем з відновлювальними джерелами» (ІЕС), 8 ст. на ОПП «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» (АКІТ) повного терміну навчання ОПП ЕЕЕ+ІЕС+АКІТ+ТЕ.

За відгуками здобувачів освіти, останні дуже задоволені якістю викладання навчального матеріалу курсів, оскільки навчання на таких курсах дозволить їм краще засвоювати складний матеріал основної програми навчання за освітнім ступенем «Бакалавр» за обраною спеціальністю.

Перелік джерел посилань

1.Бойко В.В., Відьмаченко А.П., Залоїло І.А., Малюта М.В. Фізика з основами кваліметрії: навчальний посібник. Київ, 2018. 564 с.

2.Посудін Ю. І. Фізика з основами біофізики. Київ, 2003. 400 с.

3.Бойко В. В., Булах Г. І., Відьмаченко А. П., Гуменюк Я. О., Ільїн П. П. Фізика. Київ, 2016. 468.

УДК 512.643:621.311

ОДНА МАТРИЦЯ – БАГАТО СЦЕНАРІЇВ: МАТРИЧНИЙ РОЗРАХУНОК НАПРУГ І ВТРАТ У РОЗПОДІЛЬНІЙ ЕЛЕКТРИЧНІЙ МЕРЕЖІ

Мейш Ю. А., д. техн. н., професор Дробін О.А., студент

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

Розрахунок електричної мережі зводиться до системи лінійних рівнянь, кількість яких дорівнює кількості вузлів. У реальних мережах таких рівнянь сотні й тисячі, тому їх записують і розв’язують у матричній формі [1, 2]. Матричний підхід є зручним: знайомі з лінійної алгебри поняття – визначник, обернена матриця, квадратична форма [3] – набувають тут цілком конкретного інженерного змісту.

Мета роботи – на прикладі невеликої розподільної мережі показати, як за допомогою матриці вузлових провідностей знайти напруги у вузлах і втрати потужності, а також швидко оцінити кілька режимів роботи.

Трансформаторна підстанція (вузол 0) з напругою $U_0 = 230$ В живить три вузли навантаження (рис. 1). Лінія 2–3 замикає мережу в кільце. Для простоти мережу вважаємо резистивною, а навантаження – заданими струмами.

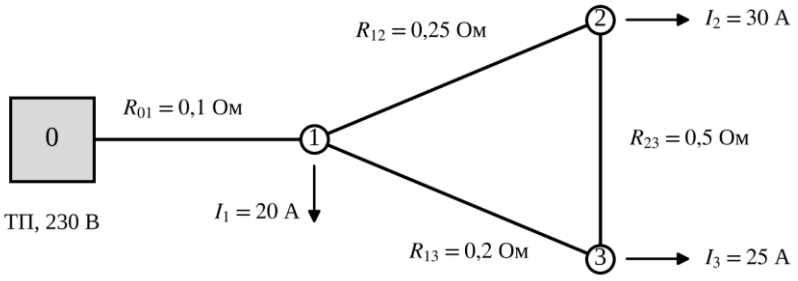


Рис. 1. Схема розподільної мережі

Позначимо через $\Delta U_k = U_0 - U_k$ спад напруги до вузла k. Перший закон Кірхгофа для вузлів 1–3 дає систему $Y\,\Delta U = I$, де Y – матриця вузлових провідностей. Її діагональні елементи дорівнюють сумі провідностей $g = 1/R$ ліній, приєднаних до вузла, а позадіагональні – провідностям між вузлами зі знаком «мінус» [1]:

$$\begin{pmatrix} 19 & -4 & -5 \\ -4 & 6 & -2 \\ -5 & -2 & 7 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta U_1 \\ \Delta U_2 \\ \Delta U_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 20 \\ 30 \\ 25 \end{pmatrix}.$$

Матриця Y симетрична, $\det Y = 380 \neq 0$, тому система має єдиний розв’язок $\Delta U = Z\,I$, де

$$Z = Y^{-1} = \frac{1}{380} \begin{pmatrix} 38 & 38 & 38 \\ 38 & 108 & 58 \\ 38 & 58 & 98 \end{pmatrix}$$

– матриця вузлових опорів. Її елемент Z_{kj} має простий фізичний зміст: на стільки вольтів знизиться напруга у вузлі k, якщо у вузлі j споживати додатково 1 А.

Розв’язок дає $\Delta U = (7{,}50;\ 14{,}34;\ 13{,}03)$ В. Найнижча напруга, 215,7 В у вузлі 2, відхиляється від 230 В на 6,2 %, тобто в межах ±10 %, які зазвичай вважають допустимими. Сумарні втрати в лініях обчислюються як квадратична форма

$$\Delta P = \Delta U^{\mathsf{T}}\, Y\, \Delta U = I^{\mathsf{T}} Z\, I \approx 906 \text{ Вт},$$

що становить 5,3 % потужності, яку видає підстанція ($230 \cdot 75 = 17\,250$ Вт).

Головна перевага матричного запису – можливість швидко розглядати різні сценарії. Якщо у вузлі 2 встановити дахову сонячну електростанцію, яка вдень віддає в мережу 20 А, то I_2 зменшується до 10 А, і новий режим знаходимо простим множенням Z на новий вектор I, без повторного розв’язування системи. Якщо ж лінію 2–3 вимкнути на ремонт, змінюється сама матриця: з неї зникає провідність $g_{23} = 2$ См. Результати подано в табл. 1.

Таблиця 1 – Напруги у вузлах і втрати потужності для трьох режимів

Режим	**U_1, В**	**U_2, В**	**U_3, В**	**ΔP, Вт**
Базовий (кільце)	222,5	215,7	217,0	906
Сонячна станція у вузлі 2	224,5	221,3	220,0	446
Лінію 2–3 вимкнено	222,5	215,0	217,5	912,5

Сонячна станція більш ніж удвічі зменшує втрати та піднімає напругу в усіх вузлах, що узгоджується з висновками про вплив розподіленої генерації на режими мереж [4, 5]. Вимкнення лінії 2–3 погіршує режим помірно, але найбільший спад напруги зростає до 15 В. Отже, матриця вузлових провідностей перетворює схему мережі на компактну систему рівнянь, а обернена матриця дає змогу оцінювати нові режими однією матричною операцією. У мережах змінного струму елементи матриць стають комплексними, а розрахунок виконують ітераційно [2], проте ідея методу лишається тією самою.

Перелік джерел посилань

1. Методичні вказівки до виконання розрахунково-практичної роботи з дисципліни «Математичні задачі в енергетиці» / уклад.: О. В. Гай, А. П. Нікіфоров. Київ : НУБіП України, 2022.

2. Grainger J. J., Stevenson W. D. Power System Analysis. New York : McGraw-Hill, 1994.

3. Strang G. Introduction to Linear Algebra. 6th ed. Wellesley : Wellesley-Cambridge Press, 2023.

4. Костенко Г., Згуровець О. Сучасний стан та перспективи розвитку відновлюваної розподіленої генерації в Україні. Системні дослідження в енергетиці. 2023. № 2 (73). С. 4–17. DOI: 10.15407/srenergy2023.02.004.

5. Плотиця Ю. О., Комар В. О. Аналіз впливу фотоелектричних станцій на нормальний режим роботи локальної електричної системи. Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2026). Вінниця: ВНТУ, 2026. URL: https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2026/paper/view/30053.

УДК 620.92:551.594.1(091)

ЕВОЛЮЦІЯ ПІДХОДІВ ДО ВІДБОРУ ЕНЕРГІЇ АТМОСФЕРНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ: ВІД ПРОМИСЛОВИХ ОЧІКУВАНЬ ДО АВТОНОМНОГО ЖИВЛЕННЯ

Лисак О. О., аспірант; Мошноріз М. М., к.т.н., доцент

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна.

Ідея використання енергії атмосферного електричного поля має понад півторастолітню історію, і ця історія показова для методології інженерних досліджень: очікування від нового джерела тривалий час випереджали кількісну оцінку його можливостей. Мета роботи — виокремити етапи розвитку підходів до відбору атмосферної електрики та чинники, що зумовлювали перехід між ними.

Перший етап (середина XIX ст.) — якісні патентні пропозиції. Патент Віона 1860 р. передбачав підняту аеростатом мережу проводів, яка разом із заземленими провідниками мала утворити «електричну батарею великої потужності» для промислових потреб; водень для аеростата пропонувалося отримувати електролізом від самої установки [1]. Жодної кількісної оцінки доступної потужності патент не містить.

Другий етап (1920-ті рр.) — інженерне опрацювання з активною іонізацією. Плаусон запатентував систему металевих аеростатів на висоті від 300 до 5000 м із вістрями та препаратами радію й полонію, які, за його твердженням, суттєво посилюють іонізацію; установки потужністю від 1 до 100 кВт він називав малими, а в обґрунтуванні наводив різницю потенціалів близько 2 млн В між землею та висотою 2 км [2]. Майже одночасно Вілсон запропонував модель глобального електричного кола, у якій грози заряджають верхні шари атмосфери, а струм повертається до землі через області «хорошої погоди» [3]. Проте кількісної оцінки струму, обмеженого провідністю повітря, у патенті Плаусона немає.

Третій етап (1970-ті рр.) — експериментальна демонстрація. О. Єфименко створив електретний і коронний двигуни, що працювали від електричного поля Землі; енергія надходила до них через прості антени з радіоактивними або вістряними колекторами, а в роботі наведено початкові результати [4].

Четвертий етап (2000–2010-ті рр.) — кількісні оцінки. Бройєр оцінив густину енергії атмосферного поля та швидкість його відновлення, зіставив їх з іншими джерелами й дійшов висновку, що потреби окремих малопотужних пристроїв, зокрема електростатичних двигунів, задовольнити можна, а великомасштабним джерелом атмосферна електрика навряд чи стане [5]. Кроулі подав атмосферу еквівалентною схемою Тевеніна й показав, що навіть для дуже великих колекторів на значних висотах доступна потужність — порядку кіловата, а за технологій того часу — не більше кількох ватів [6]. Зіставлення з «малими» установками Плаусона на 1–100 кВт наочно показує розрив між очікуваннями та можливостями джерела.

На сучасному, п’ятому етапі прикладні пошуки тривають: зокрема, патент Lockheed Martin 2015 р. описує лазерне формування провідного плазмового

каналу, у тому числі між землею та хмарою [7]. Водночас зростає інтерес до історії самої атмосферної електрики, зокрема ролі стікання струму з вістря [8].

З цієї історії випливають три методологічні висновки. Перший — небезпека «ілюзії потенціалу»: великі різниці потенціалів (близько 250 кВ між іоносферою та землею [9], мільйони вольт у розрахунках Плаусона) створюють враження потужного джерела, тоді як доступну потужність визначає струм, обмежений малою провідністю повітря: густина струму провідності «хорошої погоди» становить лише близько 2 пА/м² [9]. Другий — нове джерело доцільно оцінювати за еквівалентною схемою ще до проєктування пристрою, як це зроблено в [6]. Третій — критерій цінності джерела зміщується від абсолютної потужності до функції, тобто живлення визначеного класу малопотужних споживачів [5, 6].

Розглянутий випадок доцільно використовувати у викладанні дисциплін з відновлюваних і нетрадиційних джерел енергії як навчальний приклад того, як кількісна модель джерела дисциплінує інженерні очікування.

Перелік джерел посилань

1. Improved Method of Utilizing Atmospheric Electricity : пат. 28793 США / H. C. Vion. Опубл. 19.06.1860.

2. Conversion of Atmospheric Electric Energy : пат. 1540998 США / H. Plauson. № 437107 ; заявл. 13.01.1921 ; опубл. 09.06.1925.

3. Wilson C. T. R. Investigations on lightning discharges and on the electric field of thunderstorms. Phil. Trans. R. Soc. Lond. A. 1921. Vol. 221. P. 73–115.

4. Jefimenko O. Operation of Electric Motors from the Atmospheric Electric Field. Am. J. Phys. 1971. Vol. 39, № 7. P. 776–778. DOI: 10.1119/1.1986281.

5. Breuer M. L. Feasibility of tapping atmospheric charge as a power source. Renewable Energy. 2003. Vol. 28, № 7. P. 1121–1127. DOI: 10.1016/S0960-1481(02)00210-0.

6. Crowley J. M. The Fair-Weather Atmosphere as a Power Source. Proc. ESA Annual Meeting on Electrostatics 2011. Paper A2. 14 p. URL: https://electrostatics.org/wp-content/uploads/2023/08/2011_A2.pdf (дата звернення: 10.11.2026).

7. System for harvesting atmospheric electricity : пат. 9160156 США / E. H. Allen, S. Macheret. Опубл. 13.10.2015.

8. McGinness B. P. S., Harrison R. G., Aplin K. L., Airey M. W. The role of point discharge in the historical development of atmospheric electricity. Hist. Geo Space Sci. 2025. Vol. 16. P. 51–63. DOI: 10.5194/hgss-16-51-2025.

9. Rycroft M. J., Nicoll K. A., Aplin K. L., Harrison R. G. Recent advances in global electric circuit coupling between the space environment and the troposphere. J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2012. Vol. 90–91. P. 198–211. DOI: 10.1016/j.jastp.2012.03.015.

УДК 621.3.045:658.589:378

АДАПТАЦІЯ ТИПОВИХ ІНЖЕНЕРНИХ РОЗРАХУНКІВ ДО ВИМОГ СЬОГОДЕННЯ

І.М. Трунова,к.т.н., доцент

Державний біотехнологічний університет,
м. Харків, Україна

Методологія вищої технічної освіти, насамперед, спрямована на впровадження передових світових технологій та методик в освітянський процес,

але важливо і вдосконалювати те, що вже використовувалося, адаптуючи ці технології та методики до вимог сьогодення. В складних умовах воєнного часу актуальним є ремонт пошкодженого енергетичного обладнання, зокрема, силових трансформаторів, наприклад, такий, що потребує заміни обмоток. Відомі алгоритми розрахунків, що передують такому виду ремонту силового трансформатора, можуть виконуватися і за допомогою сучасних онлайн калькуляторів, однак, це спрощений підхід. Важливіше навчити студента конструювати обмотки силового трансформатора та досліджувати його характеристики, наприклад, за допомогою самостійно розробленої блок-схеми алгоритму розрахунків [1] та відповідної комп'ютерної програми, яка дозволяє використовувати ітераційний процес розрахунків, оптимізуючи технічні характеристики трансформатора, зокрема, зменшуючи втрати активної потужності [2]. Оптимізаційна модель дослідження можливих технічних характеристик силового трансформатора до капітального ремонту з заміною обмоток, яка дозволяє виявити найбільш впливові на результат оптимізації чинники, запропонована в [3]. Ця техніко-економічна модель багатокритеріальної оптимізації з групами цільових функцій: за конструктивними критеріями; за технічними критеріями з обмеженнями, що висуваються у стандарті [4]; за економічними критеріями, зокрема, з використанням строку окупності інвестицій. Використання для дослідження оптимізаційної моделі в розрахунках, що передують капітальному ремонту силового трансформатора із заміною обмоток, дозволить підвищити якість та ефективність ремонту.

Перелік джерел посилань

1. Шевченко П. С. Розробка блок-схеми алгоритму розрахунку характеристик неробочого ходу силового трансформатора /П. С. Шевченко// Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції «Електроенергетика, електромеханіка та технології в АПК: наукові пошуки молоді» – Харків: ДБТУ, 2026. – С. 59.
2. Четверіков Ю. А. Оптимізація технічних характеристик силових трансформаторів під час ремонту/Ю. А. Четверіков, І. М. Трунова//Зб.наук.праць Міжнародній науково-технічної конференції «Енергоефективність та енергетична безпека електроенергетичних систем» – Харків: НТУ «ХПІ», 2024. – С.40-41.
3. Трунова І. М. Техніко-економічна модель капітального ремонту силового трансформатора із заміною обмоток / І. М. Трунова, А. І. Середа, О. А. Савченко, С. А. Попадченко, С. В. Галько // Науковий Вісник ТДАТУ. - 2025. – Вип. 25, том 2. – С.98-105.
4. Трансформатори силові. Типова інструкція з експлуатації: СОУ 40.1-21677681-07:2009. [Чинний з 25.06.2009 р.]. Київ, 2009. 111 с.

УДК 517.3:620.9

ПОВЕРХНЕВІ ІНТЕГРАЛИ В РОЗРАХУНКАХ МАГНІТНОГО ПОТОКУ ТА ТЕПЛОВИХ ВТРАТ

Мейш Ю. А., д. техн. н.; професор Чередніченко С. С., студент
Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

Поверхневі інтеграли дають змогу обчислювати магнітний потік через виток і теплову потужність, що проходить крізь поверхню обладнання [1]. Мета роботи – пояснити їх зміст на навчальних прикладах генератора, трубопроводу та електричного проводу.

Інтеграл першого роду $\iint_S f\, dS$ підсумовує скалярну величину f по елементах площі. Для теплової потужності це нормальна складова густини теплового потоку. Інтеграл другого роду визначає потік векторного поля $\boldsymbol{F}$ крізь орієнтовану поверхню S:

$$\Psi = \iint_S \boldsymbol{F}\cdot\boldsymbol{n}\, dS,$$

де $\boldsymbol{n}$ – одинична нормаль, dS – елемент площі. У добутку $\boldsymbol{F}\cdot\boldsymbol{n} = F\cos\alpha$ праворуч F означає модуль вектора, а α – кут між полем і нормаллю. Для параметризації $\boldsymbol{r} = \boldsymbol{r}(u,v)$, $(u,v)\in D$ з узгодженою орієнтацією нормалі за вектором $r_u \times r_v$ маємо:

$$\iint_S \boldsymbol{F}\cdot\boldsymbol{n}\, dS = \iint_D \boldsymbol{F}\,(\boldsymbol{r}(u,v))\cdot(\boldsymbol{r}_u\times\boldsymbol{r}_v)\,du\,dv, \qquad dS = |\boldsymbol{r}_u\times\boldsymbol{r}_v|\,du\,dv.$$

Перший приклад – магнітний потік через плоский виток площею S в однорідному полі з індукцією $\boldsymbol{B}$. Оскільки $\boldsymbol{B}\cdot\boldsymbol{n}$ однаковий в усіх точках витка, інтеграл зводиться до добутку [2]:

$$\Phi = \iint_S \boldsymbol{B}\cdot\boldsymbol{n}\, dS = BS\cos\alpha.$$

За $B = 0{,}4$ Тл, $S = 0{,}02$ м² і $\alpha = 60°$ маємо $\Phi = 0{,}004$ Вб; за співнапрямлених нормалі й поля – 0,008 Вб. Нехай N однакових витків рівномірно обертаються з кутовою швидкістю ω навколо осі, перпендикулярної до поля. За початкового кута α(0) = 0 маємо $\alpha = \omega t$, а ЕРС за законом Фарадея:

$$\mathcal{E}(t) = -N\frac{d\Phi}{dt} = NBS\omega\sin\omega t.$$

Для $N = 100$ і $\omega = 314$ рад/с (приблизно 50 Гц) амплітуда ЕРС становить $\mathcal{E}_m = NBS\omega \approx 251$ В. Це спрощена модель генератора [2]. ЕРС визначається швидкістю зміни потокозчеплення NΦ зі знаком мінус; напруга на навантаженні залежить також від внутрішнього опору.

Для труби радіусом $r = 0{,}05$ м і довжиною $L = 2$ м з теплоізольованими торцями задамо бічну поверхню: $\boldsymbol{r}(\varphi, z) = (r\cos\varphi,\ r\sin\varphi,\ z)$, $0 \le \varphi \le 2\pi$, $0 \le z \le L$. Тоді $|\boldsymbol{r}_\varphi \times \boldsymbol{r}_z| = r$, $dS = r\, d\varphi\, dz$. За сталої нормальної складової густини потоку назовні $q = 80$ Вт/м²:

$$P = \iint_S q \; dS = \int_0^L \int_0^{2\pi} q \; r \, d\varphi \, dz = 2\pi r L q \approx 50{,}3 \text{ Вт}.$$

За незмінних умов протягом години $Q = Pt \approx 181$ кДж [3]. Нехай розподіл по колу неоднорідний: $q(\varphi) = q_0 \, (1 + 0{,}5\sin\varphi)$, де q_0 = 80 Вт/м². Інтеграл від $\sin\varphi$ за повний оберт дорівнює нулю, тому потужність залишається 50,3 Вт. Водночас густина потоку змінюється від 40 до 120 Вт/м². Отже, однакові сумарні втрати можуть відповідати різним локальним умовам теплообміну.

Для замкненої поверхні S, що обмежує об'єм V, і зовнішньої нормалі теорема Гаусса – Остроградського дає [1]:

$$\oiint_S \boldsymbol{q} \cdot \boldsymbol{n} \, dS = \iiint_V \text{div}\boldsymbol{q} \; dV.$$

Тут q – вектор густини теплового потоку. У стаціонарному режимі без перенесення теплоти речовиною div q дорівнює об'ємній потужності тепловиділення. Для мідного проводу з перерізом A = 2,5 мм² та сталим питомим опором $\rho = 1{,}72 \cdot 10^{-8}$ Ом·м опір одиниці довжини $R' = \rho/A \approx 0{,}0069$ Ом/м. За постійного струму $I = 20$ А теплова потужність на одиницю довжини $P' = I^2 R' \approx 2{,}75$ Вт/м [2]. Для довгого проводу нехтуємо осьовим відведенням теплоти. За зовнішнього радіуса ізоляції $r = 3$ мм середня густина потоку назовні $q = P'/(2\pi r) \approx 146$ Вт/м². Подвоєння струму збільшує її вчетверо лише за незмінного опору. Допустимий струм потребує окремого розрахунку температури й умов охолодження.

Наведені величини є навчальними. Приклади показують, що для правильного розрахунку потрібно чітко визначити поверхню, напрям нормалі та одиниці вимірювання. Поверхневі інтеграли пов'язують математичні поняття з роботою генераторів, теплових мереж і кабельних ліній та є основою для подальшого вивчення електротехніки й теплотехніки.

Перелік джерел посилань

1. Вища математика. Частина 2. Кратні, криволінійні, поверхневі інтеграли та елементи теорії поля. Практикум : навч. посіб. / уклад.: В. М. Горбачук, Ю. В. Співак. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. 60 с. URL: https://ela.kpi.ua/handle/123456789/70328.
2. Гулівець О. М., Штапенко Е. П., Волнянський Д. М., Лучанінова О. П. Електрика і магнетизм : навч. посіб. / за ред. О. М. Гулівця. Дніпро : УДУНТ, 2026. 154 с. DOI: 10.15802/978-617-8314-94-1.
3. Гільчук А. В., Халатов А. А., Доник Т. В. Теорія теплопровідності : підручник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 131 с. URL: https://ela.kpi.ua/handle/123456789/48701.

Наукове видання

Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування (теорія, практика, історія, освіта)

Матеріали
XIII Міжнародної науково-технічної конференції
м. Київ, 18 листопада 2026 р.

Відповідальний за видання: Окушко О.В.

Технічний редактор: Сорокін Д.С.

Комп`ютерне складання та верстання: Сорокін Д.С.