

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»



КЛЕН КАТЕРИНА СЕРГІЇВНА

УДК 621.314

**ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ПОБУДОВИ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ
ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ НА БАЗІ ЕНТРОПІЙНОЇ ДИВЕРГЕНЦІЇ**

05.09.12 – Напівпровідникові перетворювачі електроенергії

РЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ – 2025

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі електронних пристроїв та систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України, м. Київ.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Жуйков Валерій Якович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (м. Київ)

Опоненти: доктор технічних наук, професор
Яськів Володимир Іванович,
Тернопільський національний технічний університет
імені Івана Пулюя, професор кафедри
радіотехнічних систем;

доктор технічних наук, професор
Денисов Юрій Олександрович,
Національний університет «Чернігівська
політехніка», завідувач кафедри електроніки,
автоматики, робототехніки та мехатроніки;

доктор технічних наук, доцент
Алексієвський Дмитро Геннадійович,
Запорізький національний університет, Інженерний
навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні,
професор кафедри електроніки, інформаційних систем
та програмного забезпечення.

Захист відбудеться «13» травня 2025 р. о «15:00» годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.19 у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, просп. Берестейський, 37, корп. 1, ауд. 05.

Захист транслюватиметься на YouTube-каналі Вченої ради КПІ ім. Ігоря Сікорського:

<https://www.youtube.com/@vchenaradakpi/streams>

З дисертацією можна ознайомитись у Науково-технічній бібліотеці ім. Г.І. Денисенка Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», за адресою: 03056, м. Київ, проспект Берестейський, 37, та на сайті Вченої ради Університету за адресою: <https://rada.kpi.ua>.

Про дату та місце захисту громадськість проінформовано «04» квітня 2025 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради



К.Т.Н., доц.

Володимир ШВАЙЧЕНКО

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сучасний сталий розвиток енергетики в світі реалізують підвищенням енергетичної ефективності завдяки використанню традиційних енергоресурсів та більш широкому залученню до енерговиробництва економічно ефективних і екологічно «чистих» енергетичних ресурсів відновлюваних джерел енергії. Доступність значної частини невідновних ресурсів зменшується через їх вичерпний потенціал, зростання вартості їх видобування і транспортування, негативний екологічний і соціальний вплив. У теперішній час підвищену увагу фахівців в галузі електроніки та електротехніки привертають традиційні та новітні вимоги до енергетики: забезпечення стійкості в умовах кризових явищ; створення нових технологій генерування; зберігання і передавання електроенергії; перехід до організації «інтелектуального» керування в енергетиці; створення автономних джерел енергії.

В роботах Шидловського А.К., Стогнія Б.С., Кириленка О.В., Кудрі С.О., Кузнєцова М.П., Рєзцова В.Ф., Долбні В.Т., Сокола Є.І., Буткевича О.Ф., Липківського К.О., Юрченка М.М., Жуйкова В.Я., Ямненко Ю.С., Стахіва П.Г., Денисова О.І., Жемерова Г.Г., Wang Jian, Jiangdong Liu, Xiaojuan Han розроблено основи теорії керування напівпровідниковими перетворювачами у локальних системах електроживлення, спрямовані на забезпечення роботи установок на основі відновлюваних джерел енергії в режимі відбору максимальної потужності та реалізацію раціонального використання енергії накопичувача. Однак, виконати обидві задачі керування одночасно неможливо, оскільки відбір максимальної енергії від установки на основі відновлюваного джерела енергії реалізують в точці, а раціональне використання енергії накопичувача забезпечують на деякому часовому інтервалі. Зазначена особливість подібна принципу невизначеності Гейзенберга, і потребує розробки теоретичних засад інтервального керування перетворювачами в локальних системах електроживлення.

Для раціонального використання енергії первинного потоку у локальних системах електроживлення, як розімкнутих відкритих системах з деякими ентропійними характеристиками: по-перше, потоку первинної енергії на вході системи та, по-друге, потоку енергії, що споживається навантаженням, необхідно мінімізувати розбіжність між цими потоками завдяки визначенню ентропійної дивергенції, як інтегральної характеристики оцінки ступеню варіативності процесів генерації, споживання та накопичення енергії.

Оскільки існуючі підходи до розробки теоретичних засад керування перетворювачами залишають місце для підвищення ефективності використання потоків енергії генерації та споживання завдяки врахуванню їх особливостей, а саме – фундаментальної подвійної структури (у вигляді стійкого тренду та флуктуацій, що відповідають Вінеровському процесу) та фрактальної природи, то розробка системного підходу до керування напівпровідниковими перетворювачами на основі застосування аналогу принципу невизначеності Гейзенберга, розрахунку ентропійної дивергенції та врахування особливостей потоків енергії генерації та споживання є окремою актуальною задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження за темою дисертаційної роботи виконувалися на кафедрі електронних пристроїв

та систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за темами, які фінансувалися: 1) Міністерством освіти і науки України: «Теоретичні засади обробки дискретних функцій з модульним аргументом та використання їх для моніторингу біотелеметричних показників людини в надзвичайних ситуаціях» (№ ДР 0115U000352, 2017 – 2018 рр.); «Розробка неінвазивної пасивної акустичної системи нового покоління для вимірювання критичних фізіологічних параметрів головного мозку та внутрішнього вуха людини» (№ ДР 0118U003533, 2018 – 2019 рр.), «Система енергозабезпечення високочастотних вентильно-індукторних двигунів дрона з багатокомірковими перетворювачами і просторово-часовою модуляцією» (№ ДР 0120U102131, 2020 – 2021 рр.); 2) за рахунок зовнішнього інструменту допомоги Європейського Союзу для виконання зобов'язань України у Рамковій програмі Європейського Союзу з наукових досліджень та інновацій “Горизонт 2020”: «Smart-моніторинг ефективності функціонування локальних систем енергозабезпечення з альтернативними джерелами енергії» (№ ДР 0123U102848, 2023 – 2024 рр.). У зазначених науково-дослідних роботах автором зроблено обґрунтування задач дослідження та розроблено теоретичні основи енергоефективного керування перетворювачами у системах електроживлення.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка теоретичних засад керування напівпровідниковими перетворювачами, заснованих на аналогові принципу невизначеності Гейзенберга, ентропійному аналізі потоків енергії генерації та споживання з врахуванням їх подвійної структури та фрактальної природи, для вирішення проблеми підвищення ефективності використання енергії у локальних системах електроживлення з установками на основі відновлюваних джерел енергії.

Поставлена мета вимагає вирішення наступних наукових задач:

1. Аналіз функціонування локальних систем електроживлення з установками на основі відновлюваних джерел енергії та напівпровідниковими перетворювачами за оцінювання ефективності розподілу енергії між накопичувачами та навантаженнями.

2. Реалізація інтервального керування перетворювачами у локальних системах електроживлення із врахуванням аналогу принципу невизначеності Гейзенберга.

3. Розробка алгоритмів керування перетворювачами у локальних системах електроживлення для розподілу потоків енергії за флуктуаціями, що відповідають Вінерівському процесу.

4. Реалізація керування режимами роботи перетворювачів за принципом ентропійної дивергенції для мінімізації розбіжності потоку первинної енергії на вході системи та потоку енергії, що споживає навантаження.

5. Розробка алгоритмів прогнозного керування перетворювачами з врахуванням фрактальної природи процесів генерації та споживання енергії.

6. Створення моделей та проведення комп'ютерного моделювання роботи системи електроживлення з врахуванням стохастичних параметрів потоків енергії генерації та споживання для підтвердження адекватності запропонованих моделей та правочинності запропонованої теорії.

7. Розробка та практична реалізація алгоритмів керування перетворювачами для подальшого впровадження в локальних системах електроживлення.

Об'єктом дослідження є процеси перетворення енергії у локальних системах електроживлення з установками на основі відновлюваних джерел енергії.

Предметом дослідження є режимні параметри роботи систем керування напівпровідниковими перетворювачами у локальних системах електроживлення.

Методи дослідження мають комплексний характер і складаються з теоретичної складової з використанням експериментальних даних та комп'ютерного моделювання. У теоретичних дослідженнях використано: математичні основи теорії ортогональних функцій для апроксимації та відновлення даних потужності генерації та споживання; ентропійний та фрактальний аналіз, теорію мартингалів для керування накопичувачем в системах електроживлення; теорію моментів для прогнозування електроспоживання. Дослідження виконувались з використанням експериментальних даних у комп'ютерних моделях у середовищі Matlab Simulink.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

1. Вперше запропоновано метод інтервального керування перетворювачами локальної системи електроживлення на основі врахування аналогу принципу невизначеності Гейзенберга, що дозволило в 2 рази зменшити кількість інтервалів спостереження, на кожному з яких забезпечується відбір максимальної енергії від установок на основі відновлюваних джерел.

2. Вперше розроблено метод прогнозування потужності генерації сонячних батарей на основі об'єднання методів найближчих сусідів та кластеризації k -середніх, що дозволяє зменшити середню абсолютну похибку прогнозування до 4%.

3. Вперше розроблено метод керування перетворювачами для розподілу енергії між накопичувачами та навантаженням у локальних системах електроживлення з установками на основі відновлюваних джерел енергії на основі розрахунку ентропійної дивергенції, що дозволило на 3% підвищити ефективність використання енергії первинного потоку в системі.

4. Вперше доведено, що врахування фрактальної природи процесів генерації та споживання енергії при розрахунку імовірнісних моментів при прогнозуванні часового розподілу ентропії Шеннона та Реньї дозволяє на 11% підвищити точність прогнозування потужності споживання.

Практичне значення одержаних результатів. Отримані результати є теоретичною базою для створення ефективних систем керування перетворювачами у локальних системах електроживлення. Практичне значення результатів:

1. На основі теорії моментів розроблено алгоритм прогнозування та відновлення часового розподілу потужності споживання на основі розрахунку ентропії Шеннона та Реньї з підвищеною точністю.

2. Створено новий спосіб керування зарядно-розрядним пристроєм накопичувача у локальних системах з установками на основі відновлюваних джерел енергії на основі визначення різниці ентропійних дивергенцій зі сторони джерела та навантаження, що дозволяє щонайменше у 2 рази зменшити

тривалості інтервалів часу, коли накопичувач є повністю зарядженим або розрядженим.

3. На основі теорії мартингалів розроблено алгоритм оцінювання кількості енергії, яка може виявитись надмірною при заряді накопичувача та кількості енергії, що може виявитись недостатньою при його розряді, що дозволяє визначити імовірності перезаряду та надмірного розряду накопичувача за умови відсутності BMS-системи.

4. Розроблено алгоритм та програмну реалізацію розрахунку та формування керуючих імпульсів зарядно-розрядного пристрою накопичувача в локальній системі електроживлення з установкою на основі відновлюваного джерела енергії.

Одержані результати є готовими для використання у вигляді програмних блоків систем керування перетворювачами локальних систем електроживлення з установками на основі відновлюваних джерел енергії.

Результати роботи використано для вдосконалення програми прогнозування генерації електричної енергії сонячними фотоелектричними станціями ТОВ «Пролог Соларінвест» та ТОВ «Енерджилайн» та для створення методик і рекомендацій щодо підвищення ефективності використання електроенергії в системах з установками на основі відновлюваних джерел енергії громадською організацією «Асоціація науковців України». Також результати досліджень застосовано у дисциплінах «Теорія інформації», «Пристрої перетворювальної техніки», «Електронні системи керування та регулювання» при підготовці фахівців за спеціальністю 171 «Електроніка» в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інституті імені Ігоря Сікорського».

Особистий внесок здобувача. Усі методи, алгоритми, висновки та рекомендації, що містяться у дисертації, належать особисто автору.

Три роботи написано автором одноосібно [8, 12, 22].

У наукових працях, опублікованих у співавторстві, здобувачу належать: у роботах [1, 2, 5, 10] автором розроблено принципи керування потоками енергії у локальних системах електроживлення на основі використання аналогу принципу невизначеності Гейзенберга та ентропійного аналізу; у [3, 4, 30, 32] – запропоновано при побудові систем керування враховувати стохастичний характер процесів генерації та споживання енергії; у [6, 16, 19, 21, 25, 26, 36] – запропоновано для прогнозування потужності на виході установок на основі відновлюваних джерел та навантаження використовувати методи регресійного, кореляційного аналізу та кластеризації; у [7, 8, 15, 17] – розроблено математичний апарат лінійних функцій на базі функцій Уолша та функцій Франкліна для апроксимації та відновлення функцій зміни потоків первинної енергії; у [12, 22] – запропоновано використання віртуальної щільності та передавальної функції хмар як інтегральних оцінок зміни параметрів хмарного покриття; у [14, 18, 20, 24, 27, 28, 34] – визначено особливості впливу параметрів хмарного покриття на величину енергії, що отримують від сонячних батарей; у [29, 31-33, 35] – визначено особливості керування накопичувачем у локальних системах електроживлення.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на: наукових семінарах «Напівпровідникові перетворювачі в пристроях промислової електроніки» секції «Перетворення параметрів електричної енергії» НАН України (м. Київ, 2020 – 2022 рр.); міжнародних науково-технічних конференціях: «Проблеми сучасної електротехніки (м. Київ, 2018, 2020 рр.), «Smart-технології в енергетиці та електроніці» (м. Лазурне, 2017 – 2021 рр.), «IEEE International Conference on Electronics and Nanotechnology», ELNANO (м. Київ, 2022 р.), «IEEE International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics», UkrMiCo (м. Київ, 2023 р.), International conference Generacja-Przesył-Wykorzystanie GPW (м. Вроцлав, 2017 – 2023 рр.).

Публікації. Основні положення дисертації опубліковано у 36 наукових працях, у тому числі: 1 монографії, 32 статтях у наукових фахових виданнях (з них 3 статті у виданнях іноземних держав, 5 статей у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science, 3 статті без співавторів), 3 тезах доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із змісту, вступу, 6 розділів, висновків, списку використаної літератури із 235 найменувань та 5 додатків. Загальний обсяг роботи становить 395 сторінок, у тому числі 244 сторінки основного тексту, 129 рисунків та 43 таблиці.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, визначено мету дисертації та задачі наукових досліджень, показано зв'язок роботи з науковими планами та темами, сформульовано наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, наведено дані про апробацію, публікації та впровадження, наведено особистий внесок автора.

У **першому розділі** визначено особливості побудови, основні ознаки та режими роботи локальних систем електроживлення з установками на основі відновлюваних джерел енергії, приклад структурної схеми якої зображено на рис. 1, де ФЕУ – фотоелектрична установка; ВЕУ – вітроелектрична установка; Н – накопичувач; Z_H – навантаження змінного струму; В – випрямляч; К – компенсатор; ШПП – широтно-імпульсний перетворювач; І – інвертор; Σ – суматор енергії в загальному вузлі на постійному струмі; З/Р П – зарядно/розрядний пристрій накопичувача (зарядний пристрій – підвищуючий перетворювач, а розрядний пристрій – понижуючий перетворювач); ДН – давач напруги; ДП – давач потужності; локальна СК – система керування окремими перетворювачами; загальна СК – система керування локальною системою електроживлення, яка розраховує режими роботи кожного генератора та формує задаючі впливи.

Обґрунтовано, що для вирішення задачі реалізації енергоефективного керування перетворювачами у локальних системах електроживлення необхідно розробити теорію, яка охоплює: 1) побудову математичних моделей потоків первинної енергії з врахуванням їх фрактальної природи; 2) реалізацію керування перетворювачами на основі ентропійного аналізу; 3) алгоритм та систему

керування накопичувачем з врахуванням подвійної структури потоку даних у системі електроживлення.

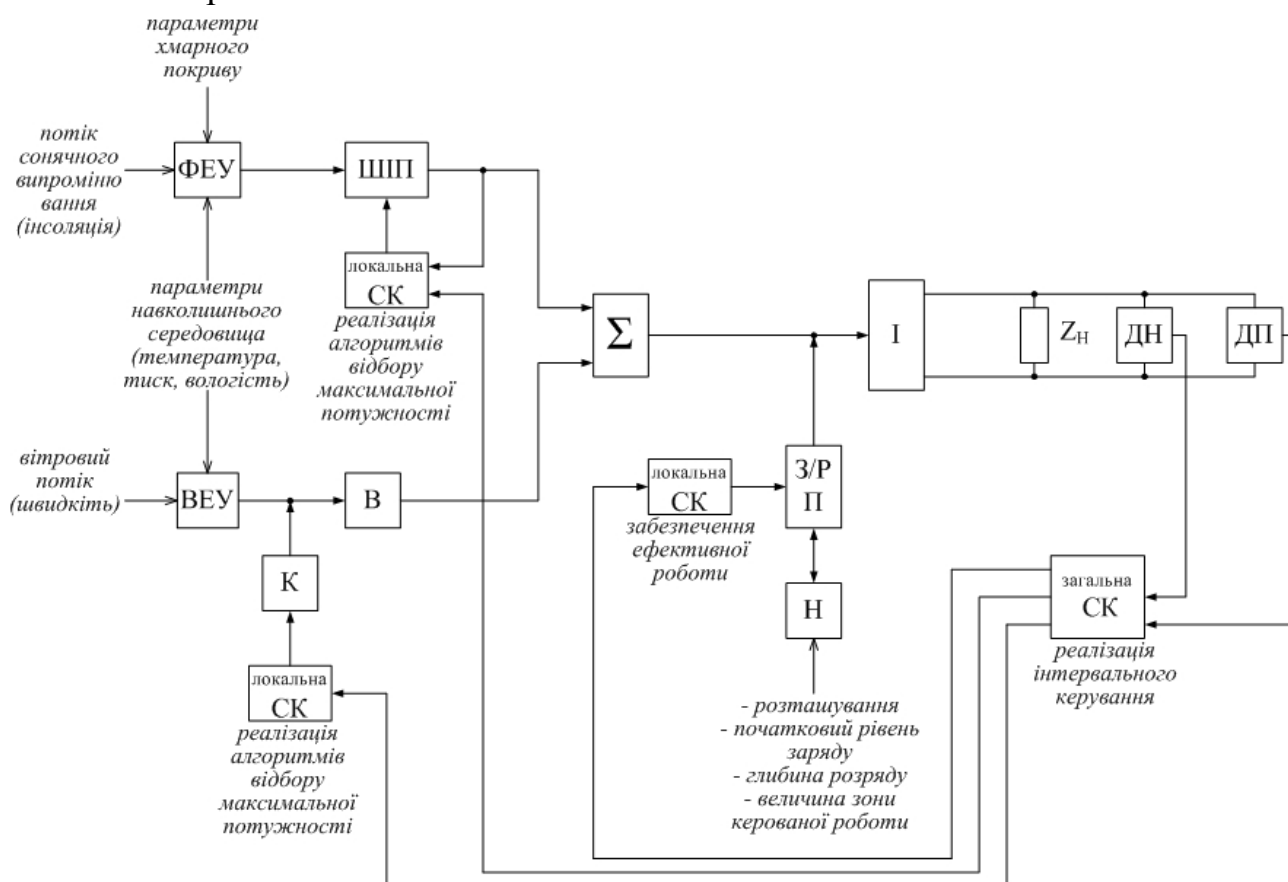


Рис. 1. Приклад структурної схеми локальної системи електроживлення

Доведено, що розробка способів енергоефективного керування процесами генерації, накопичення та споживання електричної енергії у локальних системах електроживлення потребує комплексного підходу до створення систем керування з урахуванням значної розмірності простору даних, різноманітності їх потоків, а також – забезпеченням гарантованого електроживлення навантаження протягом наперед визначеного інтервалу часу.

На підставі аналізу процесів генерації, споживання та накопичення енергії, що протікають у локальній системі електроживлення, можна виділити наступні основні задачі, виконання яких має забезпечувати загальна система керування:

1. Реалізація інтервального керування перетворювачами у локальних системах електроживлення з врахуванням стохастичного характеру потоків первинної енергії.

2. Розробка алгоритмів керування перетворювачами у локальних системах електроживлення за флуктуаціями, що відповідають Вінеровському процесу.

3. Мінімізація розбіжності потоку первинної енергії на вході системи та потоку енергії, що споживається навантаженням, із застосуванням математичного апарату розрахунку ентропійної дивергенції.

4. Визначення мінімальної необхідної ємності та тривалості інтервалу активної роботи накопичувача у системі, на якому накопичувач не заряджається і не розряджається повністю.

5. Розробка алгоритмів прогнозного керування перетворювачами з врахуванням фрактальної природи процесів генерації та споживання енергії.

6. Організація взаємодії між окремими пристроями у складі локальної системи електроживлення.

Комбінація математичних положень теорії імовірностей, мартингалів, моментів, ентропійного, фрактального, кореляційного та регресійного аналізу, апроксимації ортогональними функціями, методів прогнозування часових рядів, онтологічного аналізу, та їх застосування для побудови алгоритмів керування дасть змогу створити єдину ефективну систему керування перетворювачами локальної системи електроживлення, яка забезпечуватиме їх надійне функціонування з реалізацією відбору максимальної енергії від відновлюваних джерел та ефективним використанням енергії накопичувача в залежності від поставленої задачі.

У другому розділі проведено математичне моделювання структури потоків первинної енергії.

Роботу установок на основі відновлюваних джерел в режимі відбору максимальної енергії забезпечує накопичувач завдяки підтриманню рівності внутрішнього опору еквівалентного джерела та опору навантаження. Наявність флуктуацій процесів генерації та споживання енергії порушує цю рівність, що необхідно враховувати при розробці алгоритмів керування. Виходячи з цього, навіть при рівномірному споживанні енергії виникає задача одночасної реалізації як відбору максимальної енергії, так і забезпечення умови раціонального використання енергії накопичувача. Однак, застосовуючи аналог принципу невизначеності Гейзенберга до локальних систем електроживлення, можна стверджувати, що принципово неможливо на обраному інтервалі спостереження одночасно з мінімальною похибкою визначати: 1) положення робочої точки на зовнішній характеристиці установки на основі відновлюваного джерела для забезпечення роботи в режимі відбору максимальної енергії; 2) середнє значення енергії для забезпечення ефективної роботи накопичувача.

Для забезпечення ефективної роботи систем необхідно визначати тривалість інтервалу спостереження та кількість інтервалів спостереження на базовому інтервалі для реалізації двоінтервального керування при зміні потоку первинної енергії: як за відбором максимальної енергії від установок на основі відновлюваних джерел, так і за реалізацією раціонального використання енергії накопичувача.

При побудові ефективних алгоритмів керування перетворювачами локальних систем електроживлення необхідно попередньо проводити упереджувальну оцінку рівнів вихідної потужності установок на основі відновлюваних джерел енергії та навантаження за умови зміни потоків первинної енергії, що потребує апроксимації функцій зміни цих потоків:

- неперервними $\{R_i(t)\}$ та дискретними $\{R_i(n)\}$ функціями Франкліна;
- функціями Франкліна на кінцевому інтервалі

$$f_0 = 1,$$

$$f_{n+1} = \frac{v_{n+1} - \sum_{i=1}^n \text{mod } N f_i \otimes \sum_{j=0}^{N-1} \text{mod } N f_i(n) \otimes v_{n+1}(n)}{\pm \sqrt{\sum_{j=0}^{N-1} \text{mod } N f_{n+1}(n) \otimes f_{n+1}(n)}}; \quad (1)$$

- функціями Франкліна з m-зсувом;
- неперервними лінійними функціями на базі функцій Уолша

$$W_l(t) = \begin{cases} W_{l0}(t) = 1 \\ W_{ln}(t) = \sqrt{3} \text{wal}_{nk}(nt - k); \end{cases} \quad (2)$$

- дискретними лінійними функціями на базі функцій Уолша

$$W_{dn}(k) = \begin{cases} 1, & W_{ln}(k) = \frac{\sqrt{3}}{2}, \\ -1, & W_{ln}(k) = -\frac{\sqrt{3}}{2}, \\ 0, & W_{ln}(k) \neq \frac{\sqrt{3}}{2}, W_{ln}(k) \neq -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{cases} \quad (3)$$

Як при апроксимації функції зміни швидкості вітру функціями Франкліна (рис. 2, а), так і при апроксимації функціями на базі функцій Уолша (рис. 2, б), на кінцях інтервалу відхилення апроксимуючих значень є найбільшим, що є подібним явищу Гіббса. Для зменшення похибки апроксимації доцільно відкидати значення на кінцях інтервалу.

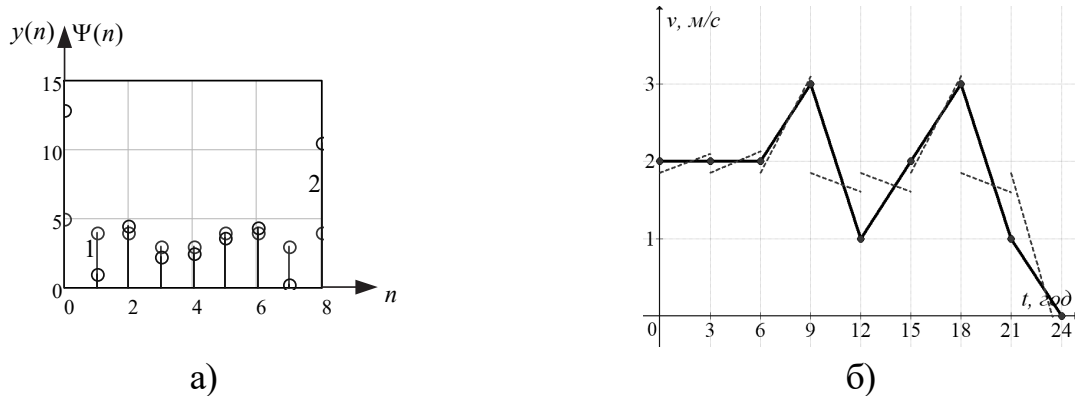


Рис. 2. Результат розкладання функції зміни швидкості вітру: у дискретний ряд Франкліна (а); за допомогою лінійних функцій на базі функцій Уолша (б)

У випадку, коли функція зміни потоку первинної енергії є періодичною, для кусково-лінійної апроксимації доцільно використовувати лінійні функції на базі функцій Уолша. В іншому випадку – функції Франкліна.

За умови, що тривалість інтервалу спостереження дорівнює T/n (для спрощення приймемо, що базовий інтервал ділиться на рівні частини) енергія $W_{T/n}$ заряду накопичувача на n інтервалах визначається за формулою:

$$W_{T/n} = \sum_{n=1}^{\infty} P_0 T/n + (k_p/2)(T/n)^2, \quad (4)$$

а максимально можлива енергія $W_{\max_n}$ установки на основі відновлюваного джерела за формулою:

$$W_{\max_n} = \frac{T^3}{R_0} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{i=1}^n \int_{(i-1)T/n}^{iT/n} \frac{\tau(E_0/T + k_E \tau)^2}{(2n\tau/(2i-1) + 1)^2} d\tau, \quad (5)$$

де i – номер інтервалу спостереження, P_0 , R_0 , E_0 – початкові значення потужності, опору та напруги у момент часу $t = 0$.

На рис. 3 наведено залежності величин енергії заряду накопичувача (крива 1) та максимально можливої енергії, яку можна отримати від установки на основі відновлюваного джерела (крива 2), від кількості інтервалів спостереження n на базовому інтервалі.

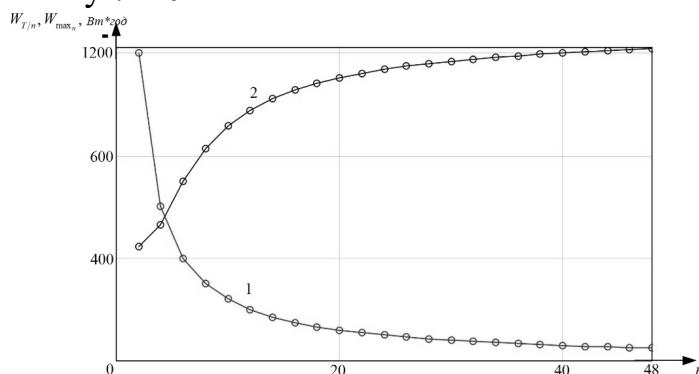


Рис. 3. Залежності величин енергії заряду накопичувача (крива 1) та енергії, яку можна отримати від установки на основі відновлюваного джерела (крива 2), від кількості інтервалів спостереження n на базовому інтервалі

Врахування аналогу принципу невизначеності Гейзенберга при керуванні локальною системою електроживлення вказує на необхідність аналізу як базового інтервалу, так і мінімального інтервалу спостереження для визначення положення робочої точки, оскільки, розглядаючи базовий інтервал T , середнє значення енергії на цьому інтервалі визначається точно, і є можливість точно визначити рівень енергії для заряду накопичувача, однак неможливо точно визначити положення робочої точки для забезпечення роботи установки на основі відновлюваного джерела в режимі відбору максимальної енергії. І навпаки, знаючи з достатньою точністю положення робочої точки (мінімальну тривалість інтервалу спостереження), неможливо точно визначити середнє значення енергії і, відповідно, рівень енергії для заряду накопичувача. Тому інтервальне керування є принципово необхідним.

Процес зміни енергії у локальних системах електроживлення має подвійну структуру і складається з основного тренду та флуктуацій, що відповідають Вінеровському процесу з математичним сподіванням, рівним нулю, та дисперсією, рівною одиниці:

$$W = \varepsilon \cdot \sqrt{t}, \quad (6)$$

де ε – незалежні нормально розподілені випадкові величини, такі, що $W_1 = f(W_0, t_0, t_1, \varepsilon_1)$, $W_2 = f(W_1, t_1, t_2, \varepsilon_2)$, $W_3 = f(W_2, t_2, t_3, \varepsilon_3)$, ..., де інтервали часу $t_i - t_{i+1}$ є довільними.

На рис. 4, а зображено графік зміни потужності на виході сонячних батарей для 18 квітня 2018 р. (суцільна крива), дані для побудови якої отримані з

лабораторії LARES Загребського технічного університету, м. Загреб, Хорватія, та її поліноміальний тренд (пунктирна крива), отриманий за поліномом 4-го порядку, а на рис. 4, б – флуктуації процесу зміни потужності відносно лінії тренду для часового інтервалу 04:10 – 17:42.

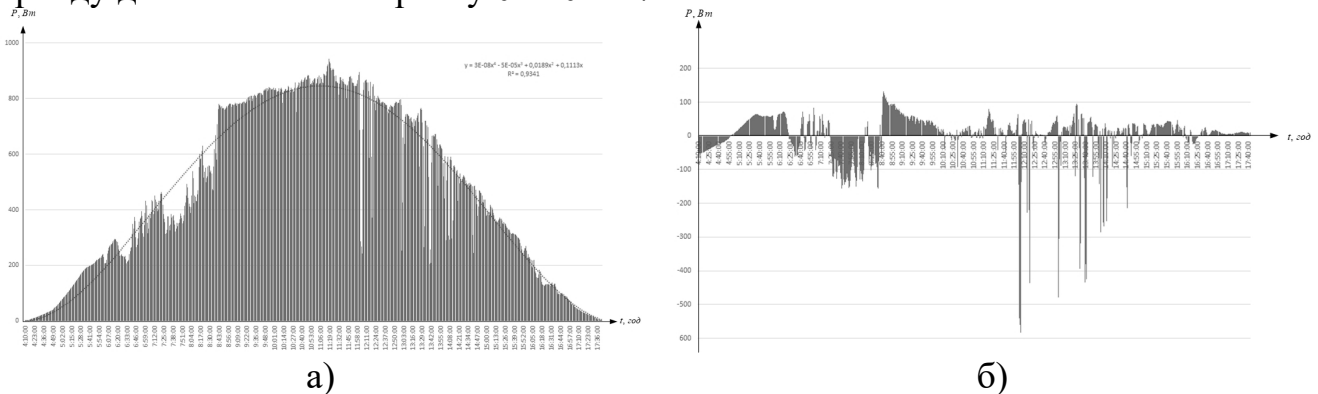


Рис. 4. Графік зміни потужності на виході сонячних батарей: а) тренд; б) флуктуації

Як видно з рисунку, частина енергії, що припадає на флуктуації, що відповідають Вінеровському процесу, для інтервалу, що аналізується, становить 4,5%, що при керуванні за флуктуаціями дозволяє на вказану величину підвищити рівень енергії первинного потоку. Відсутність врахування флуктуацій призводить до збільшення встановленої потужності системи, що є економічно недоцільним.

Як наведено на рис. 5, де відображено дискретне відображення Вінеровського процесу, процес зміни енергії є стійким ліворуч від точки **A** (переходи **B-C-D-E-F-G-H-I-J-K-A**, позначено суцільною лінією) (а), і нестійким праворуч від точки **A** (переходи **B'-C'-D'-E'-F'**, позначені штриховою лінією) (б). Умова стійкості залежить від знаку похідної у точці **A** процесу зміни енергії, який є Вінеровським, і викликає коливання системи в околі цієї точки, що може виводити систему із зони стійкої роботи. Враховуючи втрати енергії внаслідок її дисипації, точка **A** перетворюється в деяку область **O_A**, і система може не набувати властивостей нестійкості, якщо коливання, обумовлені Вінеровським процесом, не виходять за область **O_A**.

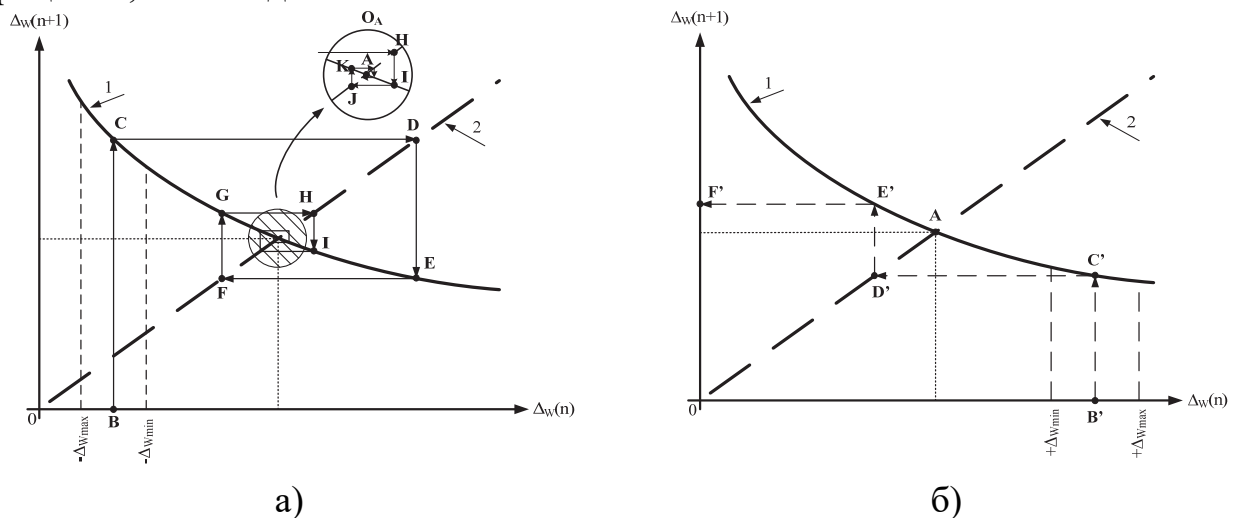


Рис. 5. Дискретне відображення Вінеровського процесу: а – процес стійкий; б – процес нестійкий

На рис. 5 а, б крива 1 відповідає процесу, що описано рівнянням $\Delta_w(n+1) = \Delta_w(n)/\sqrt{n+1}$, а крива 2 – пропорційній зміні енергії при зміні тривалості інтервалу спостереження.

При диференціюванні Вінеровського процесу за формулою Іто:

$$dF = \left[\frac{\partial F}{\partial t} + a(\Delta_w, t) \frac{\partial aF}{\partial \Delta_w} + \frac{1}{2} b^2(\Delta_w, t) \frac{\partial^2 F}{\partial \Delta_w^2} \right] dt + b(\Delta_w, t) \frac{\partial F}{\partial \Delta_w} dw_t, \quad (7)$$

де $F(\Delta_w, t)$ – деяка стохастична функція зміни енергії; Δ_w – випадковий процес зміни енергії; $dw_t = \varepsilon \sqrt{dt}$ – нескінченно малий Вінеровський шум; функція $a(\Delta_w, t)$ – коефіцієнт зносу, що характеризує відхилення центру розподілу процесу; функція $b(\Delta_w, t)$ – коефіцієнт волатильності, квадрат якого $b^2(\Delta_w, t)$ називають дифузією, що характеризує швидкість зміни дисперсії процесу, наявні доданки функції дифузії та другої похідної по Δ_w , що характеризують коливання процесу зміни енергії, і означають вихід системи з зони стійкої роботи. Тобто зміна середньоквадратичного відхилення та амплітуди коливань Вінеровського процесу у часі впливає на стійкість системи.

Доведено, що за законом повторного логарифму траєкторія Вінеровського процесу починаючи з деякого моменту часу на деякому інтервалі Δt знаходиться у області, яка обмежена кривими $(F_1, -F_1)$, і в той же час виходить за межі області $(F_2, -F_2)$:

$$F_1 = (1 + \xi) w_t (2\Delta_t \ln \ln \Delta_t)^{-1/2}, \quad F_2 = (1 - \xi) w_t (2\Delta_t \ln \ln \Delta_t)^{-1/2}. \quad (8)$$

В околі нуля Вінеровський процес веде себе схожим чином за локальним законом повторного логарифму, що призводить до розміщення його траєкторій в зонах $(F'_1, -F'_1)$ та $(F'_2, -F'_2)$ та переходу до змінної $(\Delta_t)^{-1}$:

$$F'_1 = (1 + \xi) w_t (2\Delta_t \ln \ln(1/\Delta_t))^{-1/2}, \quad F'_2 = (1 - \xi) w_t (2\Delta_t \ln \ln(1/\Delta_t))^{-1/2}. \quad (9)$$

Зниження втрат енергії у локальних системах електроживлення та підвищення їх ефективності в останні десятиліття зменшує радіус області O_A , отже зростає імовірність виходу таких систем з зони стійкої роботи та виникнення аварійних режимів. Для зниження впливу флуктуацій процесу зміни енергії, що пов'язано зі зміною навантаження або зміною рівня енергії, що генерують установки на основі відновлюваних джерел, необхідно у локальних системах встановлювати накопичувачі енергії, які б компенсували зміну енергії в діапазоні $\Delta W_{\min} \div \Delta W_{\max}$ до значення, меншого ніж радіус області O_A .

Зі збільшенням у системах електроживлення кількості джерел, навантажень та параметрів, що визначають потужність на їх виході, число сполучень параметрів значно зростає, що свідчить про необхідність роботи з простором даних великої розмірності, це потребує значних обчислювальних потужностей та спеціальних алгоритмів обробки даних. Тому виникає необхідність зниження розмірності простору даних зі збереженням корисної інформації про систему за рахунок застосування інтегральних оцінок зміни параметрів системи, що не

потребують значної кількості обчислень. Однією з інтегральних оцінок потужності сонячного випромінювання на поверхні сонячних батарей є віртуальна щільність хмарного покриву, що розраховують на основі методу зворотного перетворення та перетворення Фур'є, і дає змогу врахувати такі параметри сонячних батарей та навколишнього середовища, як: географічну широту місцевості, пору року та час доби, прозорість атмосфери, наявність хмар, характер підстилаючої поверхні, кут нахилу сонячних батарей, їх забрудненість, а також співвідношення швидкості зміщення Сонця v_c та швидкості руху хмар v_{xm} .

Крім того, параметри потоків первинної енергії, такі як інтенсивність випромінювання та швидкість вітру, можна визначати опосередковано на основі супровідних даних про температуру повітря, тиск та вологість, за допомогою кореляційного аналізу.

Підвищення точності прогнозування потужності генерації та споживання досягають врахуванням фрактальної природи процесів генерації та споживання енергії в часі, адже поруч із критичною точкою роботи системи флуктуації різної амплітуди стають рівноімовірними. Розрахунок фрактальної розмірності процесів дозволяє проводити аналіз стабільності та стійкості локальної системи електроживлення та прогнозувати наближення зміни трендів цих процесів.

У третьому розділі описано особливості керування перетворювачами локальних систем електроживлення на основі розрахунку статистичних характеристик розподілів потоків енергії на вході та виході системи.

Для оцінки відхилення даних розподілів амплітуд потужності на виході сонячних батарей та параметрів навколишнього середовища від ідеальних використано першу вибірку ентропію, як різновид ентропії Шеннона:

$$H = -\sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i, \quad (10)$$

де $p_i = P_i/A$ – імовірність потрапляння значення потужності P_i з вибірки в підінтервал i ; $A = \sum_{i=0}^N P_i$ – норма вибірки.

Зміну величини першої вибіркової ентропії потужності на виході сонячних батарей для тижня з 27 квітня по 03 травня 2019 р. наведено на рис. 6.

За допомогою лінійної інтерполяції Ньютона вперед та назад, спрогнозовано значення першої вибіркової ентропії на 8-ий день (04 травня 2019 р.) та 2-ий день (28 квітня 2019 р.) (круглі точки на рис. 6). Похибка прогнозування першої вибіркової ентропії для 8-го дня складає 4%, а для 2-го дня – 7%.

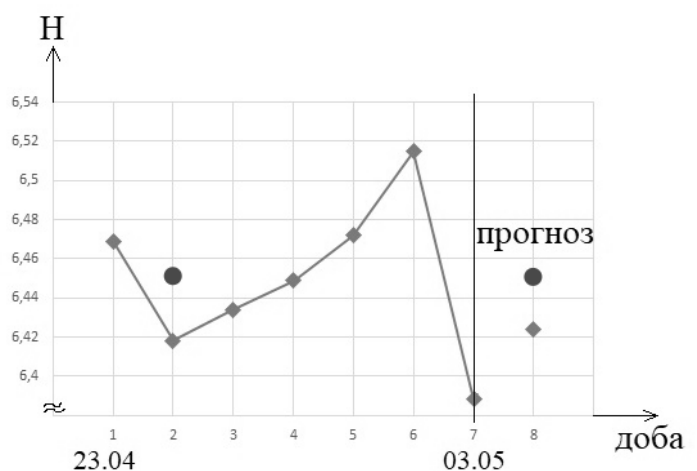


Рис. 6. Зміна величини першої вибіркової ентропії за тиждень

У випадку значних відхилень даних від тренду, похибка прогнозування зростає майже у 2 рази, однак для зменшення величини похибки прогнозування можна виконувати послідовно з корекцією на кожному інтервалі прогнозування.

Реалізація прогнозного керування локальною системою електроживлення з використанням першої вибіркової ентропії, як інтегральної характеристики стану системи, дає змогу оцінювати та порівнювати випадкові процеси генерації, споживання та накопичення енергії, не знаходячи законів їх розподілу. А визначення тренду зміни ентропії доцільно використовувати як показник можливої очікуваної потужності на виході сонячних батарей.

Застосовуючи моментне перетворення для відновлення імовірнісних процесів споживання енергії у локальних системах електроживлення на базовому інтервалі $T = r \cdot \Delta t$ та розглядаючи як функції $f(i\tau)$ ентропію Шеннона, отримано вираз, що описує часовий розподіл імовірнісних моментів $m_k^T \{f(p)\}$:

$$m_k^T = T \sum_{j=0}^r (jT)^k \times \left(- \sum_{i=0}^q p^n(i\tau, jT) \ln p(i\tau, jT) \right), \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (11)$$

де $f(p) = \ln p$ – функція дискретного аргументу; $p(i\tau)$ – розподіл імовірності процесу споживання енергії у часі на кожному з i інтервалів спостереження Δt ; q – кількість вимірювань потужності споживання на кожному інтервалі спостереження Δt ; $m_0 = p \ln p$ – імовірнісний момент нульового порядку, що відповідає інформаційній ентропії Шеннона. Тобто, ентропія Шеннона використовується для відновлення процесів споживання енергії у локальних системах електроживлення на базовому інтервалі T .

Відновлення часової залежності моментів на інтервалах спостереження для всього базового інтервалу дає змогу виконати прогнозування на деякий базовий інтервал для забезпечення ефективного використання первинної енергії за рахунок корекції ємності накопичувача.

На рис. 7 наведено розраховані (суцільні криві), відновлений (штрихова крива) та прогнозований (штрих-пунктирна крива) часові розподіли ентропії Шеннона для потужності споживання для 13 та 14 травня 2022 р. Прогнозування на наступну добу виконано з використанням даних потужності за попередню добу.

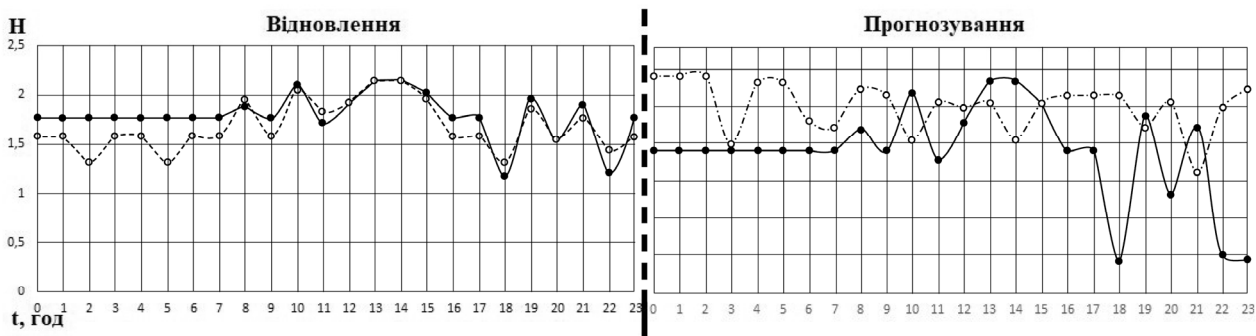


Рис. 7. Часові розподіли ентропії Шеннона: розраховані (суцільні криві); відновлений (штрихова крива); прогнозований (штрих-пунктирна крива)

Середня абсолютна похибка відновлення часового розподілу ентропії за допомогою моментних перетворень для прикладу, що наведено, складає 9,08%, а середня абсолютна похибка прогнозування – 22,53%.

Покращення точності прогнозування потужності споживання досягнуто врахуванням фрактальної природи процесу споживання енергії, що потребує перейти від розрахунку інформаційної ентропії Шеннона до розрахунку ентропії Реньї при побудові відновлюючого поліному з використанням імовірнісних моментів (рис. 8):

$$m_k^T = T \sum_{j=0}^r (jT)^k \times \frac{1}{1-D} \left(\ln \sum_{i=0}^q p^D(i\tau, jT) \right). \quad (12)$$

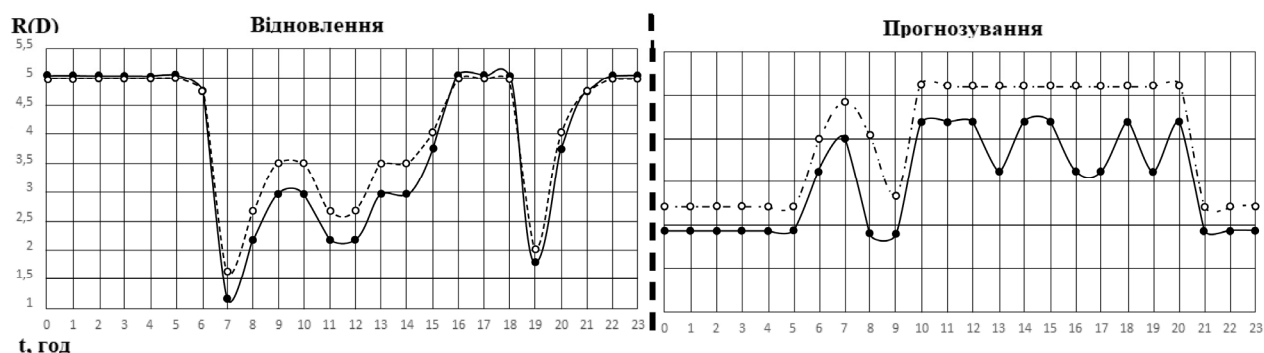


Рис. 8. Часові розподіли ентропії Реньї: розраховані (суцільні криві); відновлений (штрихова крива); прогнозований (штрих-пунктирна крива)

Середня абсолютна похибка відновлення часового розподілу ентропії Реньї за моментних перетворень для прикладу, що наведено, складає 8,35%, а похибка прогнозування – 20,12%, що покращує точність прогнозу на 11% у порівнянні з використанням ентропії Шеннона.

Підвищення точності прогнозування потужності на виході сонячної батареї досягається шляхом об'єднання методу найближчих сусідів та попередньої кластеризації методом k -середніх, що створює кластери тренувальної групи, точки яких схожі за значеннями параметрів навколишнього середовища, алгоритм якого наведено на рис. 9.

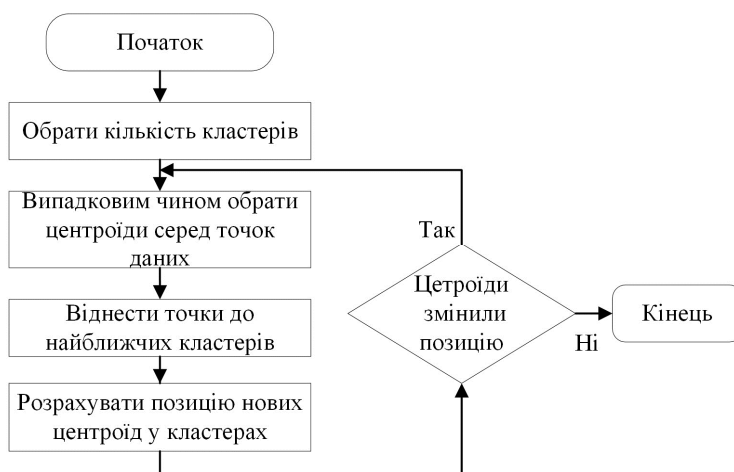


Рис. 9. Алгоритм роботи методу k -середніх

Регресію методом найближчих сусідів проводять в межах кожного кластеру з подальшим відновленням часового ряду тестової групи точок і створенням прогнозу залежної змінної за алгоритмом класичного методу найближчих сусідів.

Кластер обирають за коефіцієнтом силуету для визначення якості проведеної кластеризації (рис. 10):

$$s(i) = \frac{b(i) - a(i)}{\max\{a(i), b(i)\}}, \quad (13)$$

де i – номер точки даних, $a(i)$ – середня відстань між точкою даних та іншими точками у власному кластері, $b(i)$ – середня відстань від точки даних до точок в іншому найближчому кластері.

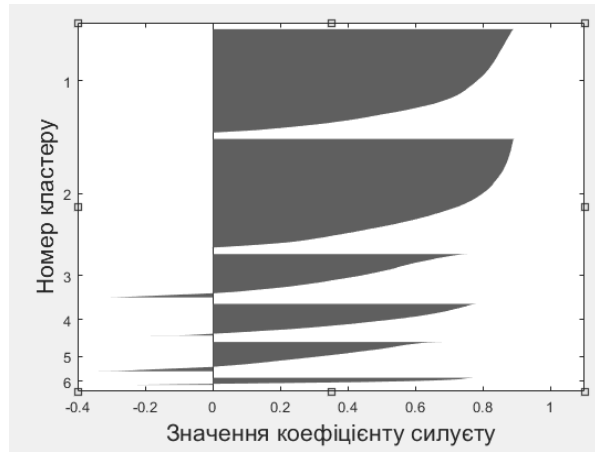


Рис. 10. Графік зміни коефіцієнту силуету для кожного кластеру параметрів навколишнього середовища

Метод об'єднання найближчих сусідів та кластеризації k -середніх дозволяє досягти більшої точності порівняно з класичним методом найближчих сусідів: похибки MSE, RMSE, MAPE, MAE зменшились на 0,5348, 0,2265, 0,38%, 0,1448 відповідно при прогнозі на 24 години. В результаті отримано модель прогнозу, яка має похибки MSE = 1,1396, RMSE = 1,0675, MAPE = 4,22%, MAE = 0,4332 відповідно для горизонту прогнозу у 24 години.

Локальну систему електроживлення складено з двох підсистем: підсистеми генерації з кількістю «носіїв»-генераторів N_G ; та підсистеми споживання з кількістю «носіїв»-споживачів N_L (рис. 11). В кожній підсистемі нерівномірно розподілено кількість E «ресурсів» – енергії. Окремо взятому носію властива індивідуальна порція ресурсів ε , що характеризує індивідуальний стан носія: окремий генератор генерує кількість енергії ε_G , а окремий споживач – споживає кількість енергії ε_L . Множина всіх можливих станів носія утворює простір індивідуальних станів. Якщо він дискретний, то індивідуальний стан являє собою комірку даного простору.

Для генераторів енергії діапазон зміни координати ε_G розділено на M_G інтервалів (комірок) малого розміру $\Delta\varepsilon_G$ зі значеннями $\varepsilon_{G1}, \varepsilon_{G2}, \dots, \varepsilon_{GM_G}$. Деякій i -й комірці відповідає кількість n_{Gi} «носіїв-генераторів» з однаковою індивідуальною порцією «ресурсу генерації» ε_{Gi} і, відповідно, об'єм «ресурсів

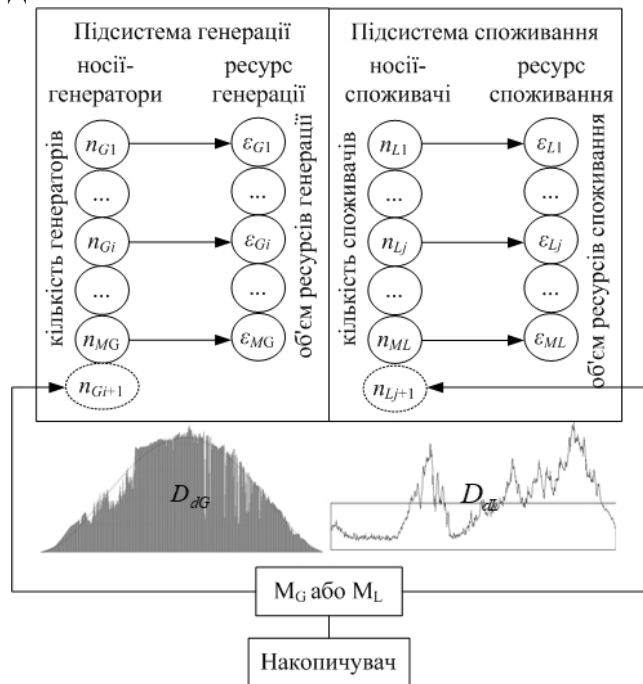


Рис. 11. Розподіл «носіїв» та «ресурсів» у підсистемах генерації та споживання локальної системи електроживлення

генерації» $E_{Gi} = n_{Gi} \cdot \varepsilon_{Gi}$. Аналогічно для споживачів діапазон зміни координати ε_L розділено на M_L інтервалів (комірок) малого розміру $\Delta\varepsilon_L$ зі значеннями $\varepsilon_{L1}, \varepsilon_{L2}, \dots, \varepsilon_{LM_L}$. Деякій j -й комірці відповідає кількість n_{Lj} «носіїв-споживачів» з однаковою індивідуальною порцією «ресурсу споживання» ε_{Lj} і, відповідно, об'єм «ресурсів споживання» $E_{Lj} = n_{Lj} \cdot \varepsilon_{Lj}$.

З врахуванням прийнятих позначень записують рівняння балансів «носіїв» та «ресурсів» для підсистем локальної системи електроживлення:

$$1) \text{ баланс «носіїв»: } \sum_{i=1}^{M_G} n_{Gi} = N_G, \quad \sum_{j=1}^{M_L} n_{Lj} = N_L,$$

$$2) \text{ баланс «ресурсів»: } \sum_{i=1}^{M_G} E_{Gi} = \sum_{i=1}^{M_G} n_{Gi} \cdot \varepsilon_{Gi} = E_G, \quad \sum_{j=1}^{M_L} E_{Lj} = \sum_{j=1}^{M_L} n_{Lj} \cdot \varepsilon_{Lj} = E_L,$$

$E_G = E_L$, де $M_G = \varepsilon_{GM_G} / \Delta\varepsilon_G$ – загальна кількість комірок генерації, $\Delta\varepsilon_G$ – обраний фіксований розмір комірки генерації; ε_{GM_G} – максимальне значення координати у просторі індивідуальних станів генерації; $M_L = \varepsilon_{LM_L} / \Delta\varepsilon_L$ – загальна кількість комірок споживання, $\Delta\varepsilon_L$ – обраний фіксований розмір комірки споживання; ε_{LM_L} – максимальне значення координати у просторі індивідуальних станів споживання.

Ефективну роботу локальної системи електроживлення забезпечено виконанням балансів «носіїв», «ресурсів» та енергії у кожний конкретний момент часу. При цьому слід враховувати, що в локальній системі електроживлення з довільною кількістю джерел та навантажень розподіл як ресурсів генерації, так і ресурсів споживання є змінним у часі.

Внаслідок зміни задаючих впливів та керування зміною станів пристроїв перетворення параметрів електричної енергії та їх технічних систем за: 1) режимами роботи; 2) параметрами пристроїв; 3) стійкістю; 4) прийняттям рішень щодо рівня комфорту, локальна система електроживлення переходить у новий мікростан – можливу комбінацію індивідуальних станів повної множини елементів системи. При зміні станів локальних систем електроживлення за: 1) прийняттям рішень щодо станів вузлів, зв'язків, тарифів; 2) керуванням станом вузлів, зв'язків, тарифів; 3) заборонаю на прийняття рішень, локальна система електроживлення переходить у новий макростан – множину відмінних мікростанів, що відтворюють ідентичні контрольовані макроскопічні характеристики системи.

Нехай $P_{Gk} : \{p_{G1k}, p_{G2k}, \dots, p_{GM_Gk}\}$, $\sum_{i=1}^{M_G} p_{Gik} = 1$ – множина апіорних

імовірностей розміщення одного (першого) генератора з N_G генераторів серед M_G комірок на k -му інтервалі. В даному випадку вважаємо, що розміщення кожного наступного елемента є незалежною подією. Декартовий добуток

$$\overbrace{P_{Gk} \times P_{Gk} \times \dots \times P_{Gk}}^{N_G} = P_{Gk}^{N_G} \text{ містить інформацію про імовірність будь-якої з } M_G^{N_G}$$

комбінацій сумісного розміщення N_G генераторів серед M_G комірок. Їх повний набір визначає множину імовірностей всіх можливих мікростанів підсистеми генерації енергії.

Аналогічно і для підсистеми споживання енергії на l -му інтервалі: повний набір декартових добутків $\overbrace{P_{Ll} \times P_{Ll} \times \dots \times P_{Ll}}^{N_L} = P_{Ll}^{N_L}$, де $P_{Ll}: \{p_{Ll1}, p_{Ll2}, \dots, p_{LM_Ll}\}$, $\sum_{j=1}^{M_L} p_{Ljl} = 1$ – множина апіорних імовірностей розміщення одного (першого) споживача з N_L споживачів серед M_L комірок, визначає множину імовірностей всіх можливих мікростанів підсистеми споживання енергії.

У загальному випадку, коли N_G елементів генерації ($n_{G1}, n_{G2}, \dots, n_{GM_G}$, $\sum_{i=1}^{M_G} n_i = N_G$) розподіляють по M_G коміркам, а N_L елементів споживання ($n_{L1}, n_{L2}, \dots, n_{LM_L}$, $\sum_{j=1}^{M_L} n_j = N_L$) – по M_L коміркам, число комбінацій реалізації такого розподілу, тобто статистична вага кожного макростану підсистеми генерації та споживання, відповідно, визначено наступним чином:

$$W_G(n_{G1}, \dots, n_{GM_G}) = \frac{N_G!}{n_{G1}! \dots n_{GM_G}!}, \quad W_L(n_{L1}, \dots, n_{LM_L}) = \frac{N_L!}{n_{L1}! \dots n_{LM_L}!}. \quad (14)$$

Імовірності цих макростанів, відповідно, дорівнюють:

$$Q_G(n_{G1}, \dots, n_{GM_G}; p_{G1k}, \dots, p_{GM_Gk}) = \frac{N_G!}{n_{G1}! \dots n_{GM_G}!} \cdot p_{G1k}^{n_{G1}} \dots p_{GM_Gk}^{n_{GM_G}}, \quad (15)$$

$$Q_L(n_{L1}, \dots, n_{LM_L}; p_{Ll1}, \dots, p_{LM_Ll}) = \frac{N_L!}{n_{L1}! \dots n_{LM_L}!} \cdot p_{Ll1}^{n_{L1}} \dots p_{LM_Ll}^{n_{LM_L}}. \quad (16)$$

У випадку, коли апіорні імовірності розміщення генераторів та споживачів є однаковими, $p_{Gik} = \text{const} = \frac{1}{M_G}$, $p_{Ljl} = \text{const} = \frac{1}{M_L}$, імовірності макростанів визначають так:

$$Q_G(n_{G1}, \dots, n_{GM_G}) = \frac{N_G!}{n_{G1}! \dots n_{GM_G}!} \cdot \frac{1}{M_G^{N_G}}, \quad Q_L(n_{L1}, \dots, n_{LM_L}) = \frac{N_L!}{n_{L1}! \dots n_{LM_L}!} \cdot \frac{1}{M_L^{N_L}}. \quad (17)$$

Імовірності мікро- та макростанів підсистем генерації та споживання локальної системи електроживлення дозволяють оцінити ступінь варіабельності процесів генерації, споживання та накопичення енергії.

Як для «носіїв»-генераторів так і для «носіїв»-споживачів запишемо вирази ентропійної дивергенції D_d за Деласом:

$$D_{dG}(n_{G1}, \dots, n_{GM_G}; p_{G1k}, \dots, p_{GM_Gk}) = \frac{-\ln Q(n_{G1}, \dots, n_{GM_G}; p_{G1k}, \dots, p_{GM_Gk})}{N_G} =$$

$$= -\sum_{i=1}^{M_G} \frac{n_{Gi}}{N_G} \ln p_{Gik} - \frac{S_G}{N_G},$$

$$D_{dL}(n_{L1}, \dots, n_{LM_L}; p_{L1l}, \dots, p_{LM_Ll}) = \frac{-\ln Q(n_{L1}, \dots, n_{LM_L}; p_{L1l}, \dots, p_{LM_Ll})}{N_L} =$$

$$= -\sum_{j=1}^{M_L} \frac{n_{Lj}}{N_L} \ln p_{Ljl} - \frac{S_L}{N_L},$$

$\frac{S_G}{N_G} = -\sum_{i=1}^{M_G} \frac{n_{Gi}}{N_G} \ln \frac{n_{Gi}}{N_G}$, $\frac{S_L}{N_L} = -\sum_{j=1}^{M_L} \frac{n_{Lj}}{N_L} \ln \frac{n_{Lj}}{N_L}$, де S_G та S_L – ентропія Больцмана для генераторів та споживачів, відповідно.

Наведені вирази для розрахунку ентропійних дивергенцій співпадають з виразом для розрахунку дивергенції Кульбака-Лейблера, і чисельно дорівнюють статистичній відстані між поточними та гранично допустимими розподілами потоків енергії генерації та споживання.

Для випадку рівних апіорних імовірностей ентропійні дивергенції D_{nd} генераторів та споживачів – це різниці між максимально можливими значеннями ентропій генерації $\ln M_G$ та споживання $\ln M_L$, та їх поточними значеннями S/N_G та S/N_L :

$$D_{ndG}(n_{G1}, \dots, n_{GM_G}; p_{G1k}, \dots, p_{GM_Gk}) = \ln M_G - \frac{S_G}{N_G},$$

$$D_{ndL}(n_{L1}, \dots, n_{LM_L}; p_{L1l}, \dots, p_{LM_Ll}) = \ln M_L - \frac{S_L}{N_L}.$$

Таким чином, максимум ентропій генерації та споживання відповідає мінімуму ентропійних дивергенцій.

У кожен момент часу окрім балансу «носіїв» та «ресурсів» у системі електроживлення повинен виконуватись баланс статистичних моментів – ентропійна дивергенція за Деласом зі сторони генераторів повинна дорівнювати ентропійній дивергенції за Деласом зі сторони споживачів:

$$D_{dG}(n_{G1}, \dots, n_{GM_G}; p_{G1k}, \dots, p_{GM_Gk}) = D_{dL}(n_{L1}, \dots, n_{LM_L}; p_{L1l}, \dots, p_{LM_Ll}).$$

Виконання цього балансу забезпечує накопичувач електроенергії, функцію керування зарядним струмом якого визначено як різницю ентропійних дивергенцій за Деласом зі сторони генераторів та споживачів для випадків різних та однакових апіорних імовірностей:

$$f_{кеpd} = D_{dG}(n_{G1}, \dots, n_{GM_G}; p_{G1k}, \dots, p_{GM_Gk}) - D_{dL}(n_{L1}, \dots, n_{LM_L}; p_{L1l}, \dots, p_{LM_Ll}) =$$

$$= -\sum_{i=1}^{M_G} \frac{n_{Gi}}{N_G} \ln p_{Gik} - \frac{S_G}{N_G} - \left(-\sum_{j=1}^{M_L} \frac{n_{Lj}}{N_L} \ln p_{Ljl} - \frac{S_L}{N_L} \right),$$

$$f_{\text{кeрnd}} = D_{\text{ndG}}(n_{G1}, \dots, n_{GM_G}; p_{G1k}, \dots, p_{GM_Gk}) - D_{\text{ndL}}(n_{L1}, \dots, n_{LM_L}; p_{L1l}, \dots, p_{LM_Ll}) =$$

$$= \ln M_G - \frac{S_G}{N_G} - \left(\ln M_L - \frac{S_L}{N_L} \right). \quad (24)$$

У випадку, коли навантаження в системі стаціонарне, і ентропійна дивергенція зі сторони навантаження дорівнює нулю, для корекції реального розподілу енергії на виході установки на основі відновлюваного джерела енергії і наближення його до ідеального необхідно використовувати накопичувач електричної енергії з функцією зарядного струму, що змінюється у відповідності до ентропійної дивергенції потоку первинної енергії, взятої з протилежним знаком. Це необхідно для того, щоб у моменти часу, коли рівень енергії, що генерує установка на основі відновлюваного джерела енергії менший за рівень енергії ідеальної кривої, накопичувач розряджався і виступав додатковим генератором; а у моменти часу, коли рівень енергії, що генерує установка на основі відновлюваного джерела енергії більший за рівень енергії ідеальної кривої, накопичувач заряджався і виступав додатковим споживачем.

Для підтвердження теоретичних викладок проведено математичне моделювання роботи локальної системи електроживлення, що складено з установки на основі відновлюваного джерела енергії, представленої еквівалентним керованим джерелом напруги, накопичувача з зарядно-розрядним пристроєм та навантаження (рис. 12), у програмному пакеті Matlab R2020a Simulink®.

Модель локальної системи електроживлення має наступні параметри: $E = 12$ В – еквівалентне кероване джерело напруги з внутрішнім опором $R_{вн} = 1$ Ом; Ideal Switch – ключ зарядного пристрою; Diode – напівпровідниковий діод; $L\phi = 1$ мГн – індуктивність фільтра; Charger – зарядний пристрій накопичувача; Battery – накопичувач; Current measurement – вимірювач миттєвого значення струму накопичувача; Selector – блок для виділення сигналу стану заряду накопичувача (State of charge); Battery Scope – блок для спостереження зміни стану заряду накопичувача; Ideal Switch1 – ключ, що підключає активне навантаження $R_{н1} = 6$ Ом для заряду накопичувача; Ideal Switch2 – ключ, що підключає додаткове активне навантаження $R_{н11} = 2,5$ Ом випадковим чином; Ideal Switch3 – ключ, що підключає активне навантаження $R_{н2} = 0,5$ Ом для розряду накопичувача; Ideal Switch4, Ideal Switch5 – ключі, що підключають додаткове активне навантаження $R_{н21} = 1,5$ Ом випадковим чином; Uniform Random Number, Uniform Random Number1 – генератори випадкових послідовностей з рівномірним законом розподілу; Relay – релейний блок; Pulse generator – генератор напруги типу «меандр» для переведення накопичувача з режиму заряду до режиму розряду; Logical Operator, Logical Operator1 – блоки логічного заперечення.

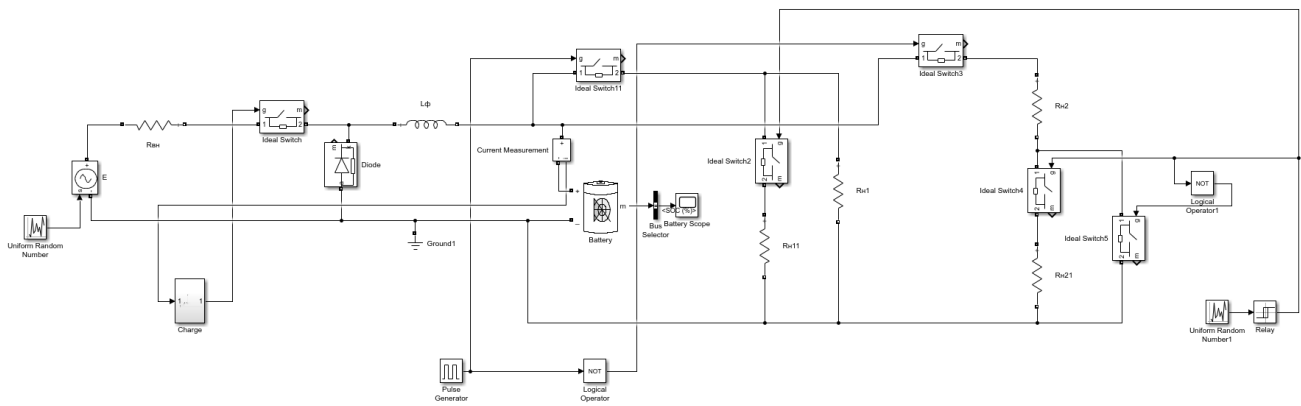


Рис. 12. Схеми моделі локальної системи електроживлення

Часову залежність зміни стану заряду накопичувача (SOC, %), отриману в результаті моделювання локальної системи електроживлення, наведено на рис. 13 (крива 1). Видно, що за час моделювання накопичувач повністю заряджений (у період з $t_1 = 800$ с до $t_2 = 1600$ с), і повністю розряджений (у період з $t_3 = 2900$ с до $t_4 = 3400$ с).

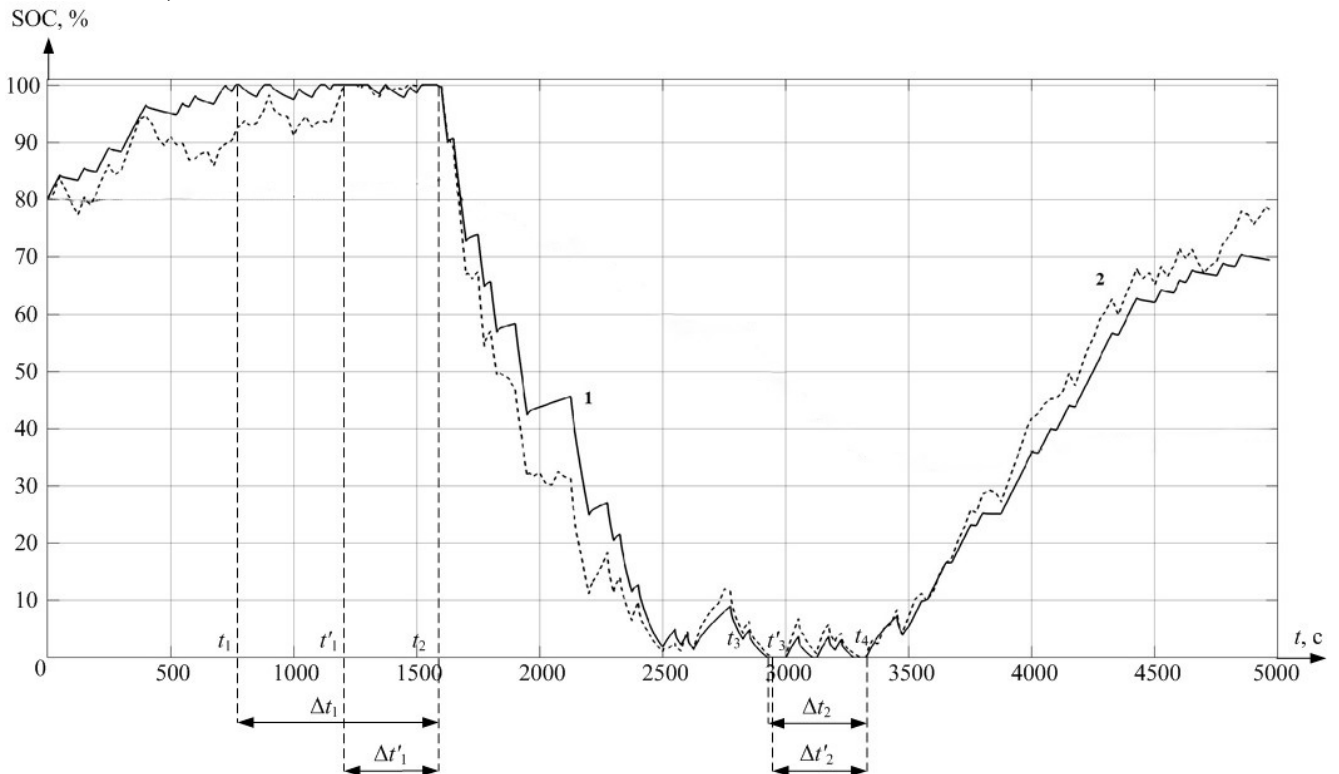


Рис. 13. Часова залежність зміни стану заряду накопичувача

Для наближення режиму роботи накопичувача до гранично допустимого, необхідно у відповідності до ентропійної дивергенції потоку сонячного випромінювання, взятої з протилежним знаком, змінювати функцію зарядного струму накопичувача, не збільшуючи при цьому величину абсолютної ємності. При цьому зменшуються тривалості інтервалів часу, коли накопичувач повністю заряджений (крива 2) (з 1200 до 1600 с) та повністю розряджений (з 2900 до 3000 с, з 3350 до 3400 с), однак баланс енергії у системі зберігається за рахунок

зменшення енергії на інтервалі 1600 – 2500 с та збільшення енергії на інтервалі 2500 – 5000 с.

Представивши на інтевалах $t_1 - t_2$ та $t_3 - t_4$ зміну стану заряду накопичувача лінійною функцією та розрахувавши площі, обмежені відповідними кривими, отримаємо різницю ΔS між рівнями дії (момент кількості руху), як функціоналу із розмірністю [енергія]×[час] (Дж·с): $\Delta S = \frac{S_1 - S_2}{S_1} \approx 6\%$. Переходячи від різниці ΔS між рівнями дії до різниці ΔW між рівнями енергій на відповідних часових інтервалах, отримуємо: $\Delta W = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \approx 3\%$.

Таким чином, при співрозмірних середніх значеннях потужності на виході установки на основі відновлюваного джерела енергії та навантаження застосування способу керування функцією зарядного струму накопичувача у локальних системах електроживлення у відповідності до ентропійної дивергенції потоку первинної енергії, взятої з протилежним знаком, дозволяє на 3% підвищити ефективність використання енергії первинного потоку в системі внаслідок зменшення на 50% тривалості інтервалу часу, коли накопичувач є повністю зарядженим та на 20% тривалості інтервалу часу, коли накопичувач є повністю розрядженим.

Четвертий розділ описує особливості розрахунку ентропійної дивергенції з врахуванням впливу подвійної структури потоків енергії генерації та споживання.

Для забезпечення формування струму у вихідному колі ВДЕ необхідно реалізувати упереджувальне керування потужністю $P_{ВДЕ}(t)$ на виході установки на основі відновлюваного джерела енергії в наступний t_{k+1} момент часу, для чого необхідно визначити в t_k момент часу потужність $P_{ВДЕ}(t_{k+1})$ за формулою:

$$P_{ВДЕ}(t_{k+1}) = P_{ВДЕ}(t_k) + \Delta P_{ВДЕ}(t_{k+1}). \quad (25)$$

За розрахованими значеннями $P_{ВДЕ}(t_{k+1})$ визначають величини $E(t_{k+1}) = k_E t_{k+1}$ та $r(t_{k+1}) = k_r t_{k+1}$, k_E та k_r – коефіцієнти масштабування з розмірностями $[B/c]$ та $[Om/c]$ відповідно.

Умову відбору максимальної енергії від установки на основі відновлюваного джерела $R_H(t) = r(t)$ при різних значеннях опору навантаження $R_H(t)$ забезпечено керуванням струмом заряду накопичувача. Величини струму заряду, мінімальної енергії заряду та необхідної ємності накопичувача залежать від статистичних характеристик розподілу потужності на виході установки на основі відновлюваного джерела енергії та навантаження: математичних сподівань $M[P_{ВДЕ}(t)]$ та $M[P_H(t)]$; дисперсій $D[P_{ВДЕ}(t)]$ та $D[P_H(t)]$; та кореляційного моменту $K_{ВДЕ,H}$ між потужностями на виході установки на основі відновлюваного джерела та навантаження.

Оскільки швидкість вітрового потоку, як і інтенсивність сонячного випромінювання, є випадковою величиною в кожний момент часу, то потужність

на виході установки на основі відновлюваного джерела енергії (вітроелектростанції або сонячної батареї) $P_{ВДЕ}(t)$ вважають випадковою функцією з певним набором випадкових реалізацій $p_{ВДЕi}(t)$ та статистичними характеристиками, які залежать від часу:

1) математичне сподівання

$$M[P_{ВДЕ}(t_k)] = \sum_{i=1}^n p_{ВДЕi}(t_k) / n; \quad (26)$$

2) дисперсія

$$D[P_{ВДЕ}(t_k)] = \sum_{i=1}^n [p_{ВДЕi}(t_k) - M[P_{ВДЕ}(t_k)]]^2 / (n-1); \quad (27)$$

3) кореляційний момент

$$K_{ВДЕ}(t_k, t_l) = \sum_{i=1}^n [p_{ВДЕi}(t_k) - M[P_{ВДЕ}(t_k)]] [p_{ВДЕi}(t_l) - M[P_{ВДЕ}(t_l)]] / (n-1), \quad (28)$$

за значеннями якого визначається максимальний інтервал $(t_l - t_k)$, на якому функція вважається стаціонарною; n – кількість значень випадкової функції.

На рис. 14 а, б зображено графіки зміни функцій $M[P_{BEV}(t_k)]$ та $M[P_{CB}(t_k)]$, які при кожному значенні аргумента t_k рівні математичному сподіванню відповідного перерізу випадкових функцій $P_{BEV}(t)$ та $P_{CB}(t)$.

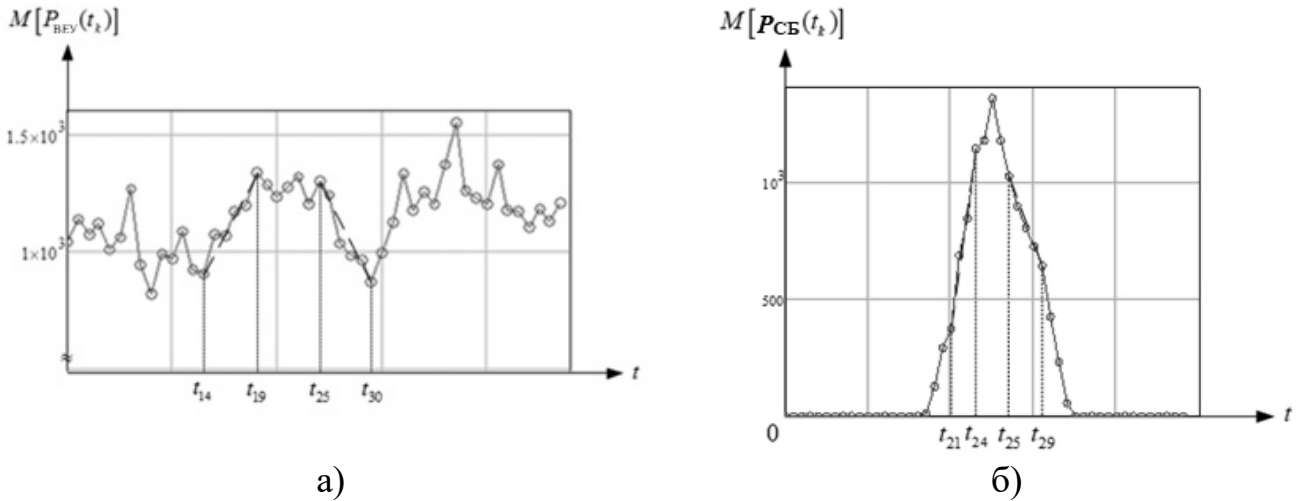


Рис. 14. Графіки зміни функцій $M[P_{BEV}(t_k)]$ (а) та $M[P_{CB}(t_k)]$ (б)

Знаючи графік зміни функції математичного сподівання $M[P_{ВДЕ}(t_k)]$ виділено інтервали стаціонарності функції $P_{ВДЕ}(t)$, на яких функцію вважатимемо однорідною з незначними випадковими коливаннями в околі деякого середнього значення. При чому ні середня амплітуда, ні характер цих коливань не зазнають суттєвих змін на обраному інтервалі стаціонарності.

Якщо б керування проводилось для моменту часу t_{15} , то для визначення струму $I(t)$ у вихідному колі вітрогенератора, який повинен бути сформований в момент t_{16} , необхідно визначити потужність $P_{BEV}(t_{16})$, і відповідно напругу $E(t_{16})$

та внутрішній опір $r(t_{16})$. Оскільки значення потужності $P_{BEV}(t_{15})$ відоме, достатньо розрахувати приріст потужності $\Delta P_{BEV}(t_{16})$ на інтервалі $\Delta t \leq (t_{16} - t_{15})$, тобто $P_{BEV}(t_{15} + \Delta t) = P_{BEV}(t_{15}) + \Delta P_{BEV}(t_{15} + \Delta t)|_{\Delta t \leq (t_{16} - t_{15})}$.

Оскільки відхилення потужності від середнього значення є Вінеровським процесом, приріст потужності $\Delta P_{BEV}(t_{15} + \Delta t)$ визначено як $VP_{BEV}(t_{15} + \Delta t) = M[P_{BEV}(t_{15})]\sqrt{t} + P_{BEV}(t_{15})\sqrt{D[P_{BEV}(t_{15})]}\sqrt{Vt}$. За даними розрахунку $VP_{BEV}(t_{15} + \Delta t)$ визначено прирости напруги $VE(t_{15} + \Delta t)$ та внутрішнього опору $Vr(t_{15} + \Delta t)$, і відповідно приріст струму $\Delta I(t_{15} + \Delta t)$.

Аналогічно, у випадку, коли як установки на основі відновлюваного джерела енергії використовують сонячні батареї, якщо б керування проводилось для моменту часу t_{15} , то для визначення струму $I(t)$ у вихідному колі сонячної батареї, який повинен бути сформований в момент t_{16} , необхідно визначити потужність $P_{CB}(t_{16})$, і відповідно напругу $E(t_{16})$ та внутрішній опір $r(t_{16})$.

Оскільки значення потужності $P_{CB}(t_{15})$ відоме, достатньо розрахувати приріст потужності $\Delta P_{CB}(t_{16})$ на інтервалі $\Delta t \leq (t_{16} - t_{15})$, тобто $P_{CB}(t_{15} + \Delta t) = P_{CB}(t_{15}) + \Delta P_{CB}(t_{15} + \Delta t)|_{\Delta t \leq (t_{16} - t_{15})}$. Приріст потужності $\Delta P_{CB}(t_{15} + \Delta t)$ визначено як $VP_{CB}(t_{15} + \Delta t) = M[P_{CB}(t_{15})]\sqrt{t} + P_{CB}(t_{15})\sqrt{D[P_{CB}(t_{15})]}\sqrt{Vt}$. За даними розрахунку $VP_{CB}(t_{15} + \Delta t)$ визначено прирости напруги $VE(t_{15} + \Delta t)$ та внутрішнього опору $Vr(t_{15} + \Delta t)$, і відповідно приріст струму $\Delta I(t_{15} + \Delta t)$.

Реалізація запропонованого розрахунку у алгоритмі керування струмом у вихідному колі установки на основі відновлюваного джерела енергії дає змогу забезпечити відбір максимальної енергії з визначеними математичним сподіванням та дисперсією.

Попередні міркування справедливі без врахування статистичного характеру навантаження. Для випадку, коли потужність навантаження $P_H(t)$ є також випадковою функцією з певним набором випадкових реалізацій $p_{Hi}(t)$, необхідно враховувати сумісний вплив двох випадкових функцій та визначити їх статистичні характеристики. При цьому мінімальна необхідна енергія заряду накопичувача H_1 визначається нижньою границею довірчого інтервалу закону розподілу потужності на виході відновлюваного джерела енергії, а необхідна ємність накопичувача – верхньою границею довірчого інтервалу.

Математичне сподівання суми двох випадкових функцій потужності на виході відновлюваного джерела енергії $P_{BDE}(t)$ та навантаження $P_H(t)$ з відповідними випадковими реалізаціями визначається сумою математичних сподівань кожної функції:

$$M[P_{BDE}(t) + P_H(t)] = M[P_{BDE}(t)] + M[P_H(t)], \quad (29)$$

а дисперсія – сумою їх дисперсій плюс подвоєний кореляційний момент:

$$D[P_{BDE}(t) + P_H(t)] = D[P_{BDE}(t)] + D[P_H(t)] + 2K_{BDE,H}. \quad (30)$$

Наявність доданка як подвійного кореляційного моменту збільшує величину довірчого інтервалу, що вказує на необхідність збільшення необхідної ємності накопичувача. Усунення доданка як подвійного кореляційного моменту можливе завдяки забезпеченню детермінованого значення струму навантаження за формування відповідного струму заряду еквівалентного накопичувача, що забезпечує детерміноване значення потужності навантаження (яке визначено або значенням математичного сподівання або максимальним значенням довірчого інтервалу) та нульовий кореляційний момент $K_{ВДЕ,Н}$.

Наявність доданка як подвійного кореляційного моменту свідчить про статистичну залежність функцій потужності на виході відновлюваного джерела енергії $P_{ВДЕ}$ та навантаження P_H і свідчить про необхідність використання для розрахунку ентропійної дивергенції, замість ентропії Больцмана чи Шеннона, умовної ентропії для поточних розподілів потоків енергії генерації та споживання:

$$\begin{aligned} D_d &= H_{ideal} - H(P_{ВДЕ} | P_H)_{real} = \\ &= H_{ideal} - \left(-\sum_i p_i(P_H) \sum_j p_j(P_{ВДЕ} | P_H) \log(P_{ВДЕ} | P_H) \right), \end{aligned} \quad (31)$$

де $p_j(P_{ВДЕ} | P_H)$ – умовна імовірність.

Оскільки за означенням умовна ентропія менша за безумовну, то значення ентропійної дивергенції, як зі сторони відновлюваного джерела енергії, так і зі сторони навантаження, збільшуються, що в подальшому впливає на точність керування.

Для реалізації ефективного прогнозного керування локальною системою електроживлення необхідно за прогнозованими значенням потужності на виході установок на основі відновлюваних джерел енергії визначати рівень надлишкової (або недостатньої) енергії для заряду (або розряду) накопичувача. У випадку, коли як установка на основі відновлюваного джерела енергії є вітроустановка, ширина зони керованої роботи накопичувача системи балансування енергії визначають похибкою прогнозування швидкості вітру.

Для забезпечення мінімально можливої похибки прогнозування швидкості вітру проведено порівняння існуючих методів прогнозування та оцінено вплив дискретності даних на похибку прогнозування.

При горизонті прогнозу більше одного інтервалу прогноз виконують послідовно з корекцією на кожному кроці. Тобто для прогнозування з горизонтом у два інтервали спочатку прогнозують дані на перший інтервал, потім використовується формула корекції, після чого з врахуванням отриманого значення прогнозуються дані на другий інтервал. Для корекції прогнозованого значення швидкості вітру використовують формулу коректора методу Хойна (на основі методу Ейлера):

$$\hat{v}_{i+1}^k = v_i + \frac{1}{2} \Delta t (\Delta v_i + \Delta \hat{v}_i), \quad (32)$$

де $\Delta v_i = v_{i+1} - v_i$, $\Delta \hat{v}_i = \hat{v}_{i+1} - \hat{v}_i$ – перші кінцеві різниці реальних та прогнозованих значень швидкості вітру у точці i ; $\hat{v}_i$ – прогнозоване значення швидкості вітру на

i -му інтервалі спостереження; v_i – останнє відоме значення швидкості вітру у вибірці; Δt – дискретність вибірки, різниця часу між двома вимірами швидкості вітру.

Для більшості методів значення похибки прогнозування зростає при збільшенні горизонту прогнозу. Точність прогнозування для даних, отриманих з дискретністю 5 хв в 1,5-2 рази більша, ніж для даних, отриманих з дискретністю 1 год, тому для прогнозування краще використовувати дані, отримані з меншою дискретністю. Використовуючи для прогнозування швидкості вітру метод Адамса з горизонтом прогнозу до 30 хв, в межах $\pm 34\%$ від середнього значення енергії можна керовано заряджати або розряджати накопичувач.

Зменшення ширини зони керованої роботи накопичувача до 68% призводить до збільшення тривалостей інтервалів часу, коли накопичувач є некерованим: на 44% збільшується інтервал часу $\Delta t'_1$, коли накопичувач повністю заряджений, і на 36% збільшується інтервал часу $\Delta t'_2$, коли накопичувач повністю розряджений (рис. 15), що вказує на необхідність застосування додаткових методів для підвищення точності прогнозування параметрів потоків первинної енергії. Збільшення тривалостей інтервалів часу, коли накопичувач є некерованим, призводить до зменшення зони розрахунку ентропійної дивергенції.

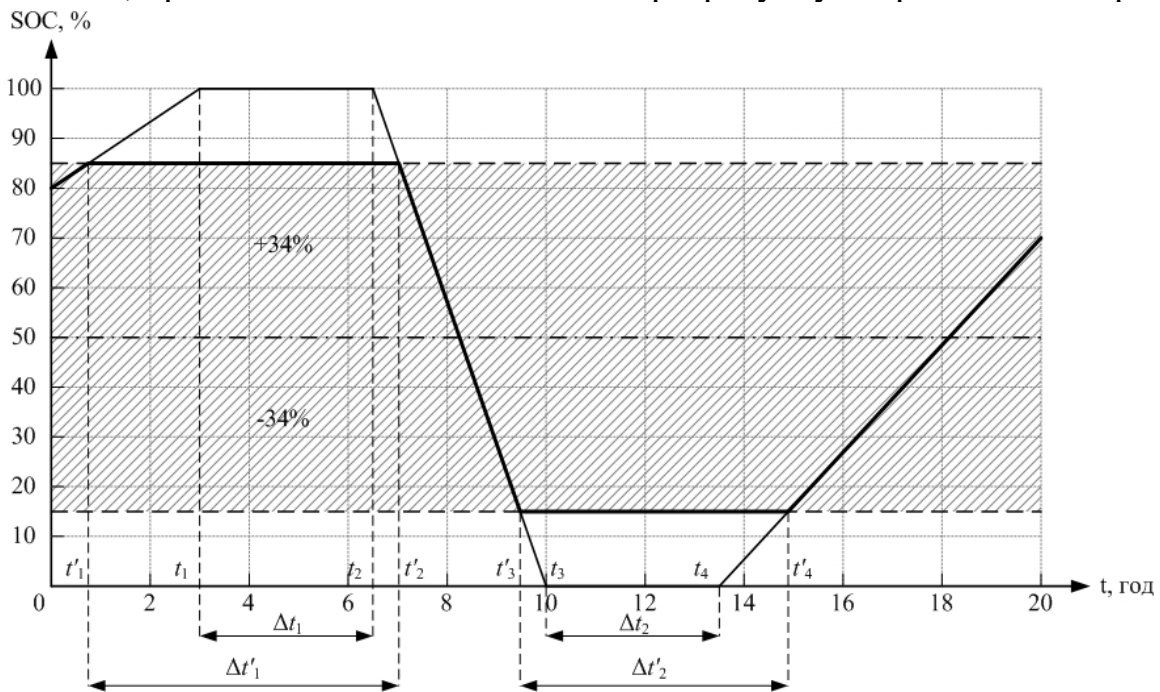


Рис. 15. Часова залежність зміни стану заряду накопичувача з зоною керованої роботи

Для забезпечення ефективної роботи накопичувача, в якому ширина зони керованої роботи визначається значенням похибки прогнозування швидкості вітру, необхідно отримувати дані з меншою дискретністю та обирати метод прогнозування швидкості вітру, що забезпечує мінімальну похибку прогнозування. Зменшення ширини зони керованої роботи призводить до збільшення інтервалів часу, коли накопичувач є повністю зарядженим або

розрядженим, проте реалізація керування за ентропійною дивергенцією дає змогу суттєво зменшити тривалість цих інтервалів.

Процес коливання рівня енергії на виході установки на основі відновлюваного джерела відносно її середнього значення і, відповідно, послідовність відхилення кількості енергії, що потрапляє на заряд або розряд накопичувача, від її середнього значення можна вважати мартингалами, адже не має значення, коли починається і закінчується процес зміни енергії, середнє значення зміни виявляється нульовим.

Нехай W_0 – початковий рівень енергії накопичувача. На кожному інтервалі спостереження виконують перевірку співвідношення енергії, що генерує установка з ВДЕ $W_{ВДЕ}$, та енергії навантаження W_H . Якщо $W_{ВДЕ} > W_H$, то накопичувач заряджається, а якщо $W_{ВДЕ} < W_H$, то накопичувач розряджається. Якщо кількість енергії, що направлена на заряд накопичувача, досягла деякого рівня $W_{\max}$, $W_{\max} > W_0$, вважатимемо його перезарядженим, $W_{\max}$ – надмірний рівень енергії заряду. Якщо ж кількість енергії, що отримується при розряді накопичувача, досягла деякого рівня $W_{\min}$, $W_{\min} < W_0$, вважатимемо його надмірно розрядженим, $W_{\min}$ – недостатній рівень енергії розряду.

Функція, що характеризує енергію накопичувача після процесів заряду або розряду, є випадковою. Нехай W_n – незалежні випадкові величини, які характеризують рівень енергії заряду або розряду накопичувача: значення $W_n = 1$ відповідає енергії заряду накопичувача з імовірністю $P(W_n = 1) = p$; значення $W_n = -1$ відповідає енергії розряду накопичувача з імовірністю $P(W_n = -1) = 1 - p = q$. Всі зазначені величини є безрозмірними, адже віднесені до деякого базового рівня енергії $W_{\text{баз}}$. Рівень енергії накопичувача після n зарядів або розрядів визначають наступним чином: $W_{AK} = W_0 + W_1 + \dots + W_n$. Процеси заряду або розряду накопичувача зупиняються, коли накопичувач надмірно розрядиться або перезарядиться, тобто у момент часу $\tau = \min\{n : W_{AK} = W_{\min} \text{ або } W_{AK} = W_{\max}\}$.

Формули для розрахунку імовірностей надмірного розряду $P(W_{AK\tau} = W_{\min})$ або перезаряду $P(W_{AK\tau} = W_{\max})$ накопичувача в момент часу τ у симетричному (імовірності заряду та розряду накопичувача є однаковими: $p = q = 0,5$) та несиметричному (імовірності заряду та розряду накопичувача не є однаковими: $p \neq q$) випадках наведено в табл. 1. При розв'язанні цієї задачі виключено випадок, коли накопичувач заряджається або розряджається $(W_{\max} - W_{\min})$ разів підряд.

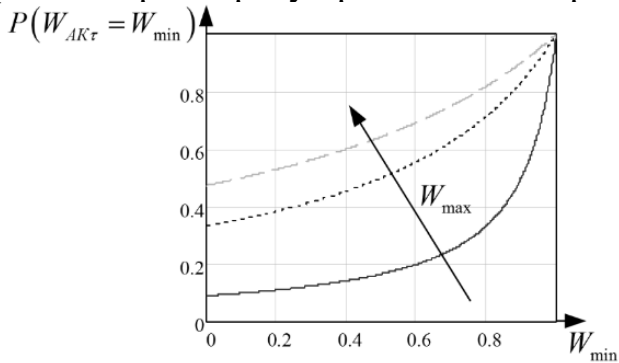
Як видно з рис. 16 а, б, на якому наведено залежності імовірностей надмірного розряду та перезаряду накопичувача від величин недостатнього рівня енергії розряду та надмірного рівня енергії заряду, з ростом як значення надмірного рівня енергії заряду, так і значення недостатнього рівня енергії

розряду імовірності як перезаряду, так і надмірного розряду накопичувача збільшуються.

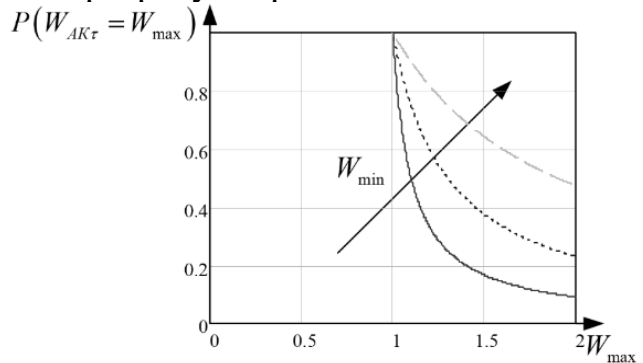
Таблиця 1. Формули для розрахунку імовірностей надмірного розряду або перезаряду накопичувача

Формули для розрахунку	Симетричний випадок	Несиметричний випадок
Імовірність надмірного розряду	$P(W_{AK\tau} = W_{\min}) = \frac{W_{\max} - W_0}{W_{\max} - W_{\min}}$	$P(W_{AK\tau} = W_{\min}) = \frac{(q/p)^{W_{\max}} - (q/p)^{W_0}}{(q/p)^{W_{\max}} - (q/p)^{W_{\min}}}$
Імовірність перезаряду	$P(W_{AK\tau} = W_{\max}) = \frac{W_0 - W_{\min}}{W_{\max} - W_{\min}}$	$P(W_{AK\tau} = W_{\max}) = \frac{(q/p)^{W_0} - (q/p)^{W_{\min}}}{(q/p)^{W_{\max}} - (q/p)^{W_{\min}}}$

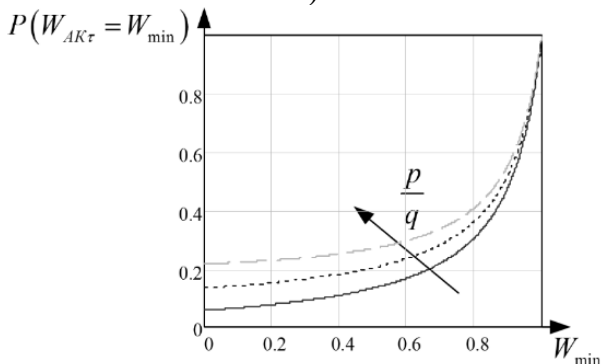
Аналізуючи рис. 16 в, г, бачимо, що з ростом співвідношення між імовірностями заряду накопичувача p та розряду накопичувача q імовірності надмірного розряду та перезаряду накопичувача збільшуються. При цьому тенденція збільшення імовірностей надмірного розряду та перезаряду накопичувача від величин недостатнього рівня енергії розряду та надмірного рівня енергії заряду при збільшенні рівня його розряду зберігається.



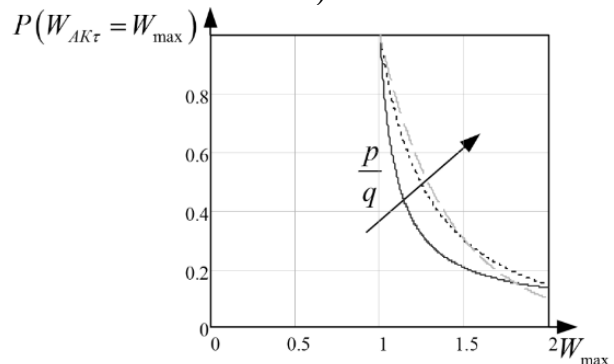
а)



б)



в)



г)

Рис. 16. Залежності імовірностей надмірного розряду та перезаряду накопичувача від величин недостатнього рівня енергії розряду та надмірного рівня енергії заряду: а, б – для симетричного випадку; в, г – для несиметричного випадку

давач потужності споживання для вимірювання миттєвих значень потужності навантаження; K – керований ключ, що комутує накопичувач з пристроєм; PE – релейний елемент, що формує сигнал керування ключем; BVE_{real} , BVE_{ideal} – блоки визначення ентропії поточного та заданого розподілів потоків енергії генерації та споживання; $БП_E$, $БП_H$ – блоки пам'яті, в яких зберігають значення потужності заданого розподілу потоку генерації та заданого розподілу потоку споживання відповідно; $BVED_E$, $BVED_H$ – блоки визначення ентропійної дивергенції зі сторони джерела та зі сторони навантаження; BVP – блок визначення різниці між ентропійними дивергенціями зі сторони джерела та навантаження.

Ентропійну дивергенцію як зі сторони джерела, так і зі сторони навантаження, розраховують як статистичну відстань між заданим та поточним розподілами потоків генерації та споживання:

$$D_d = H_{ideal} - H_{real}, \quad (35)$$

де H_{ideal} – інформаційна ентропія Шеннона заданого розподілу; H_{real} – інформаційна ентропія Шеннона поточного розподілу.

Заданий розподіл генерації у випадку, коли як установка на основі відновлюваного джерела є сонячна батарея, визначають добовою ідеальною кривою сонячного випромінювання. Заданий розподіл споживання обирають таким, що найбільше відповідають місцевості, де встановлено установку на основі відновлюваного джерела, з ряду теоретичних законів, таких як рівномірний розподіл, нормальний розподіл, розподіл Вейбулла тощо. Наприклад, при постійному значенні потужності споживання, заданим законом розподілу вважають рівномірний.

Величини ентропійної дивергенції як зі сторони джерела, так і зі сторони навантаження, мають нерівномірний характер (рис. 18, а, б).

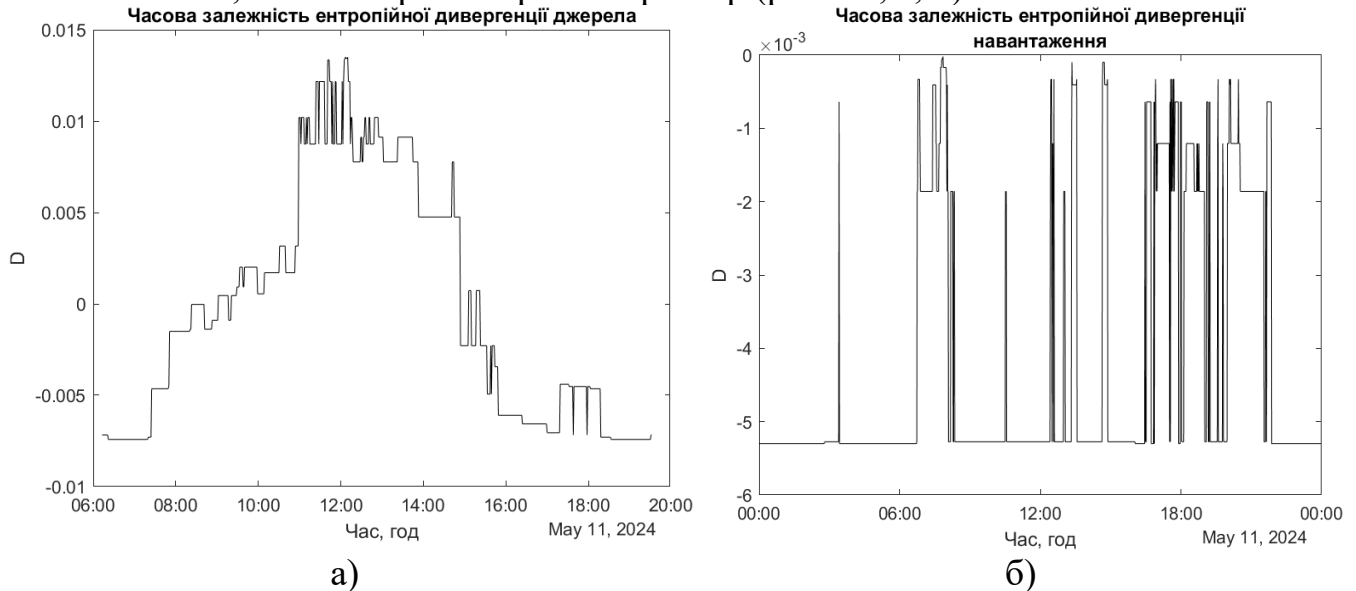


Рис. 18. Часові залежності ентропійної дивергенції: зі сторони джерела (а); зі сторони навантаження (б)

Значення з блоків визначення ентропійної дивергенції $BVED_E$ зі сторони джерела та блоку визначення ентропійної дивергенції $BVED_H$ зі сторони навантаження поступають на неінвертуючий 1 та інвертуючий 2 входи суматора

блоку визначення алгебраїчної різниці BVP між ентропійними дивергенціями зі сторони джерела та навантаження, результати обчислення якої наведено на рис. 19, а.

Значення різниці з BVP надходить до релейного елемента PE , де порівнюється з рівнем нуля: якщо рівень сигналу більший або рівний нулю, то генерується сигнал логічної одиниці на виході PE ; якщо рівень сигналу менший нуля, то генерується сигнал логічного нуля. В результаті роботи схеми генерується сигнал керування типу меандр (рис. 19, б), що передається на ключ K накопичувача для зміни режиму його роботи.

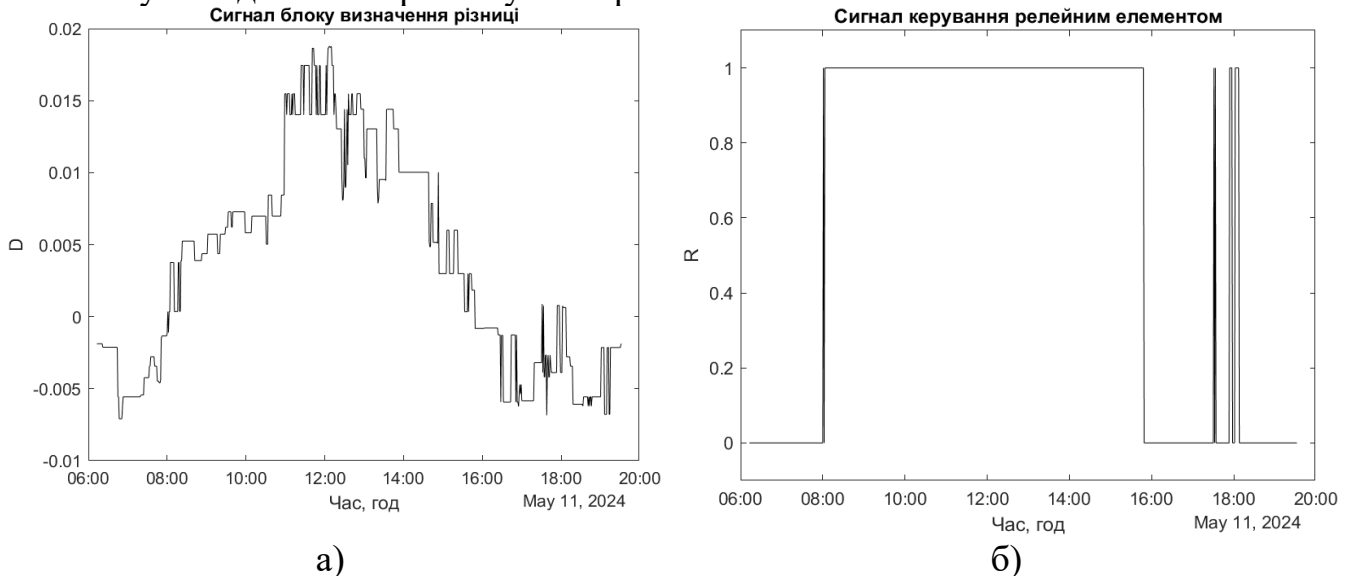


Рис. 19. Часові залежності сигналів: з виходу блоку визначення алгебраїчної різниці (а); керування накопичувачем (б)

Якщо значення ентропійної дивергенції джерела перевищує значення ентропійної дивергенції навантаження, накопичувач заряджається, тобто є додатковим навантаженням. Якщо значення ентропійної дивергенції джерела менше за значення ентропійної дивергенції навантаження, накопичувач розряджається, тобто є додатковим джерелом. У випадку, коли ключ завжди замкнений, накопичувач завжди підключено до системи, і працює у буферному режимі, забезпечуючи роботу установки на основі відновлюваного джерела енергії в режимі відбору максимальної енергії. У випадку, коли ключ завжди розімкнений, накопичувач відключено від системи.

Описаний спосіб реалізує жорстке керування накопичувачем. Для реалізації м'якого керування задаюче значення зарядно-розрядного струму накопичувача формують відповідно до тренду зміни різниці ентропійних дивергенцій зі сторони джерела та зі сторони навантаження

Зменшення тривалостей інтервалів часу, коли накопичувач є повністю зарядженим або повністю розрядженим досягається: 1) формуванням сигналу керування релейним елементом відповідно до алгебраїчної різниці між ентропійними дивергенціями зі сторони джерела та навантаження при заряді та розряді накопичувача; 2) формуванням задаючого значення зарядно-розрядного струму накопичувача відповідно до тренду зміни різниці ентропійних дивергенцій

при заряді та розряді накопичувача; 3) комбінацією цих підходів (жорстким керуванням при заряді накопичувача, м'яким керуванням при розряді та навпаки).

Для підтвердження теоретичних викладок проведено комп'ютерне моделювання роботи системи електроживлення, яку складено з сонячної батареї, представлені еквівалентним керованим джерелом напруги, накопичувача з зарядно-розрядним пристроєм та навантаження, схему моделі якої наведено на рис. 20. Моделювання проводиться для вранішнього піку споживання.

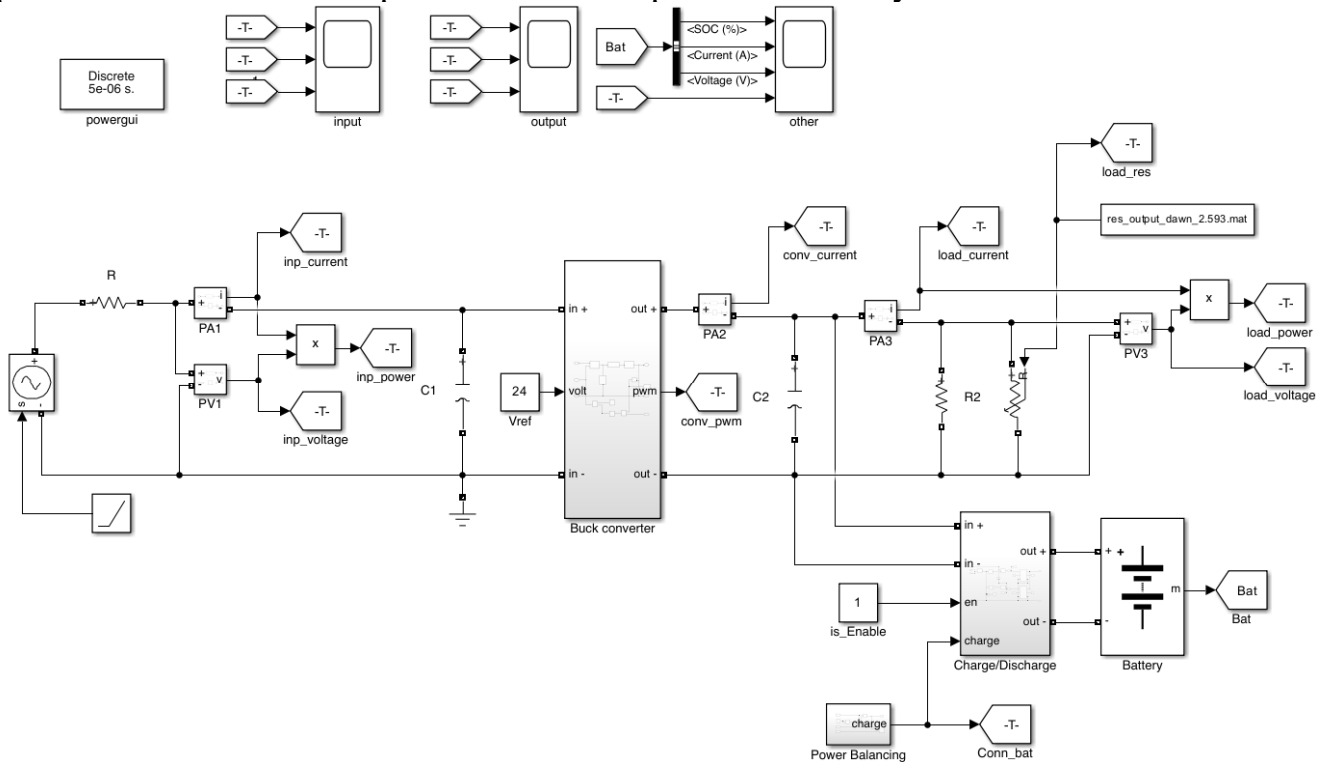


Рис. 20. Схема моделі локальної системи електроживлення

На рис. 20 позначено:

- Кероване джерело напруги та навантаження;
- Buck Converter – понижуючий широтно-імпульсний перетворювач;
- Ємності C1 та C2 (400 мкФ), які необхідні використовувати в процесі роботи ШПІ;
- Зарядно-розрядний пристрій Charge/Discharge;
- Блок акумуляторних батарей Battery;
- Блок Power Balancing, який реалізовує керування режимом роботи зарядно-розрядного пристрою Charge/Discharge (1 відповідає заряджанню акумулятора, 0 – розряджанню);
- Блок константи для активації зарядно-розрядного пристрою is_Enable (0 відповідає простою, 1 – робочий режим);
- Блоки для вимірювання миттєвих значень напруги джерела та навантаження (Current Measurement, Voltage Measurement);
- Goto блоки для потреб відлагодження роботи схеми.

Часові залежності зміни стану заряду, струму та напруги накопичувача, а також сигнал комутації, при використанні підходу, заснованого на балансуванні миттєвих значень потужності навантаження і джерела, наведено на рис. 21.

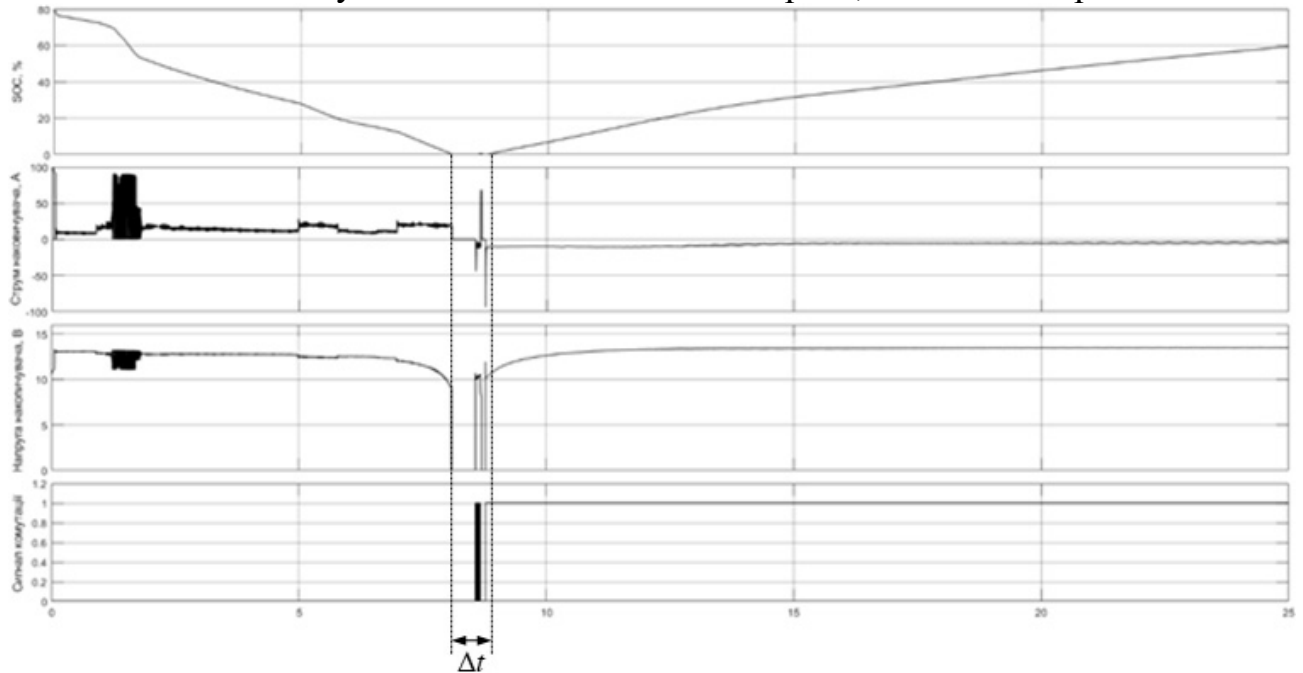


Рис. 21. Часові залежності зміни стану заряду, струму розряду, напруги накопичувача, сигналу комутації при використанні балансування потужностей

Як видно з рис. 21, за час моделювання накопичувач повністю розряджений на інтервалі Δt з 7,6 до 8,6 с.

Для порівняння, часові залежності зміни стану заряду, струму розряду, напруги накопичувача та сигналу комутації при використанні алгоритму, який заснований на визначенні різниці ентропійних дивергенцій, наведено на рис. 22.

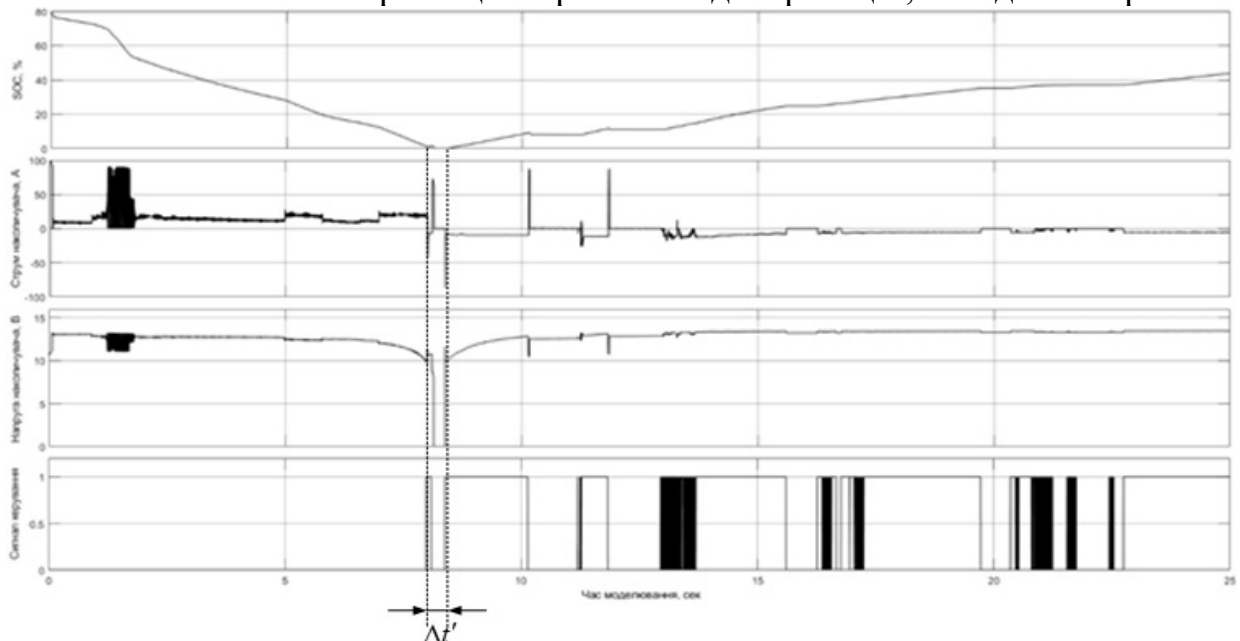


Рис. 22. Часові залежності зміни стану заряду, струму розряду, напруги накопичувача, сигналу комутації при використанні різниці ентропійних дивергенцій

З рис. 22 видно, що при застосуванні для керування описаного алгоритму на основі визначення різниці ентропійних дивергенцій зменшується тривалість інтервалу часу $\Delta t'$, коли накопичувач повністю розряджений – з 7,6 с до 8,1 с. Таким чином, застосування описаного алгоритму дозволяє в 2 рази зменшити тривалість інтервалу часу, коли накопичувач є повністю розрядженим.

Таким чином застосування способу керування функцією зарядного струму накопичувача відповідно до різниці ентропійних дивергенцій дає змогу на 50% зменшити тривалість інтервалу часу, коли накопичувач є повністю розрядженим.

Врахування фрактальних розмірностей графіків генерації та споживання енергії ($q_G = 1,1476$, $q_H = 1,2166$) завдяки переходу від розрахунку ентропії Шеннона до розрахунку ентропії Реньї дає змогу отримати наступні часові залежності зміни стану заряду, струму розряду, напруги накопичувача а також сигналу комутації (рис. 23).

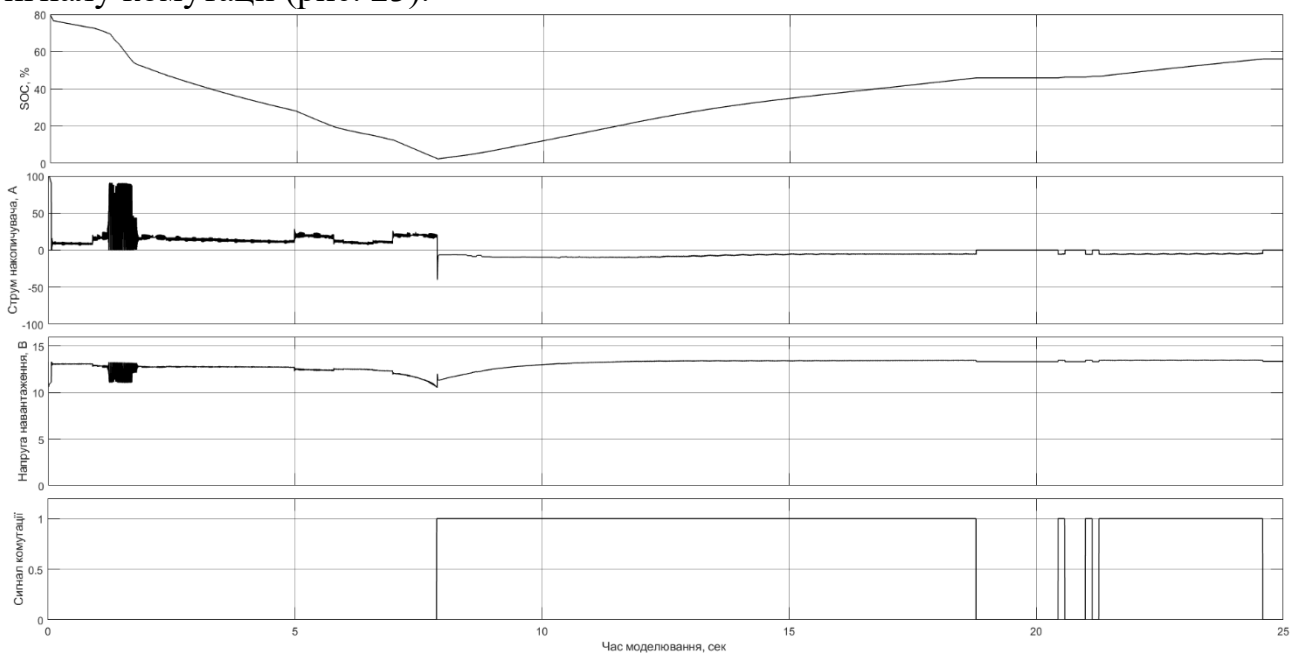


Рис. 23. Часові залежності зміни стану заряду, струму розряду, напруги накопичувача, сигналу комутації при врахуванні фрактальних розмірностей

З рис. 23 видно, що при застосуванні для керування алгоритму на основі визначення різниці ентропійних дивергенцій з розрахунком ентропії Реньї інтервал часу, коли накопичувач повністю розряджений, зникає.

Для реалізації запропонованого способу керування зарядно-розрядним пристроєм накопичувача було розроблено програмне забезпечення мовою програмування MATLAB та Python. Початкове діалогове вікно програми наведено на рис. 24.

Програмне забезпечення складається з трьох блоків, які можуть працювати незалежно один від одного, або послідовно.

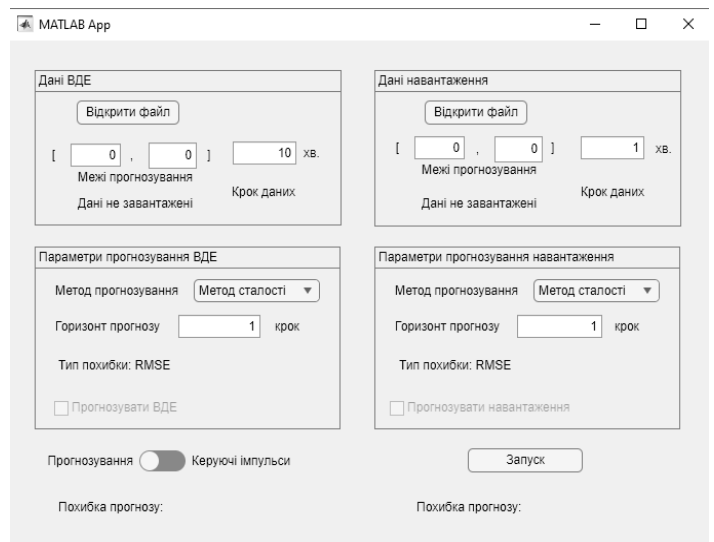


Рис. 24. Початкове діалогове вікно програми

Завантаження та обробка даних виконується у блоці «ДАНІ». Після завантаження відбувається відновлення пропусків даних там, де це необхідно (замість відсутніх значень або викидів). Блок «ПРОГНОЗУВАННЯ» дозволяє виконувати прогнозування потужності на виході установки на основі відновлюваного джерела та на навантаженні. Прогнозування може виконуватись окремо для ВДЕ та навантаження, або сумісно. Блок «РОЗРАХУНОК ТА ФОРМУВАННЯ КЕРУЮЧИХ ІМПУЛЬСІВ» дає змогу виконати наступні розрахунки та побудувати відповідні графіки залежностей:

- розрахунок алгебраїчної різниці ентропійних дивергенцій зі сторони джерела та навантаження та формування сигналу керування типу меандр в залежності від знаку алгебраїчної різниці;

- визначення граничного закону розподілу;
- розрахунок імовірностей;
- розрахунок ентропій Шеннона;
- розрахунок ентропійних дивергенцій зі сторони джерела та навантаження;
- розрахунок алгебраїчної різниці ентропійних дивергенцій;
- формування керуючого сигналу типу меандр.

Розроблене програмне забезпечення дає змогу виконувати прогнозне керування зарядно-розрядним пристроєм накопичувача у локальній системі електроживлення з установкою на основі відновлюваного джерела енергії на основі розрахунку різниці ентропійних дивергенцій зі сторони джерела та навантаження та формувати сигнал керування комутатором зарядно-розрядного пристрою в залежності від знаку алгебраїчної різниці.

Блок-схема алгоритму керування комутатором зарядно-розрядного пристрою накопичувача наведено на рис. 25.

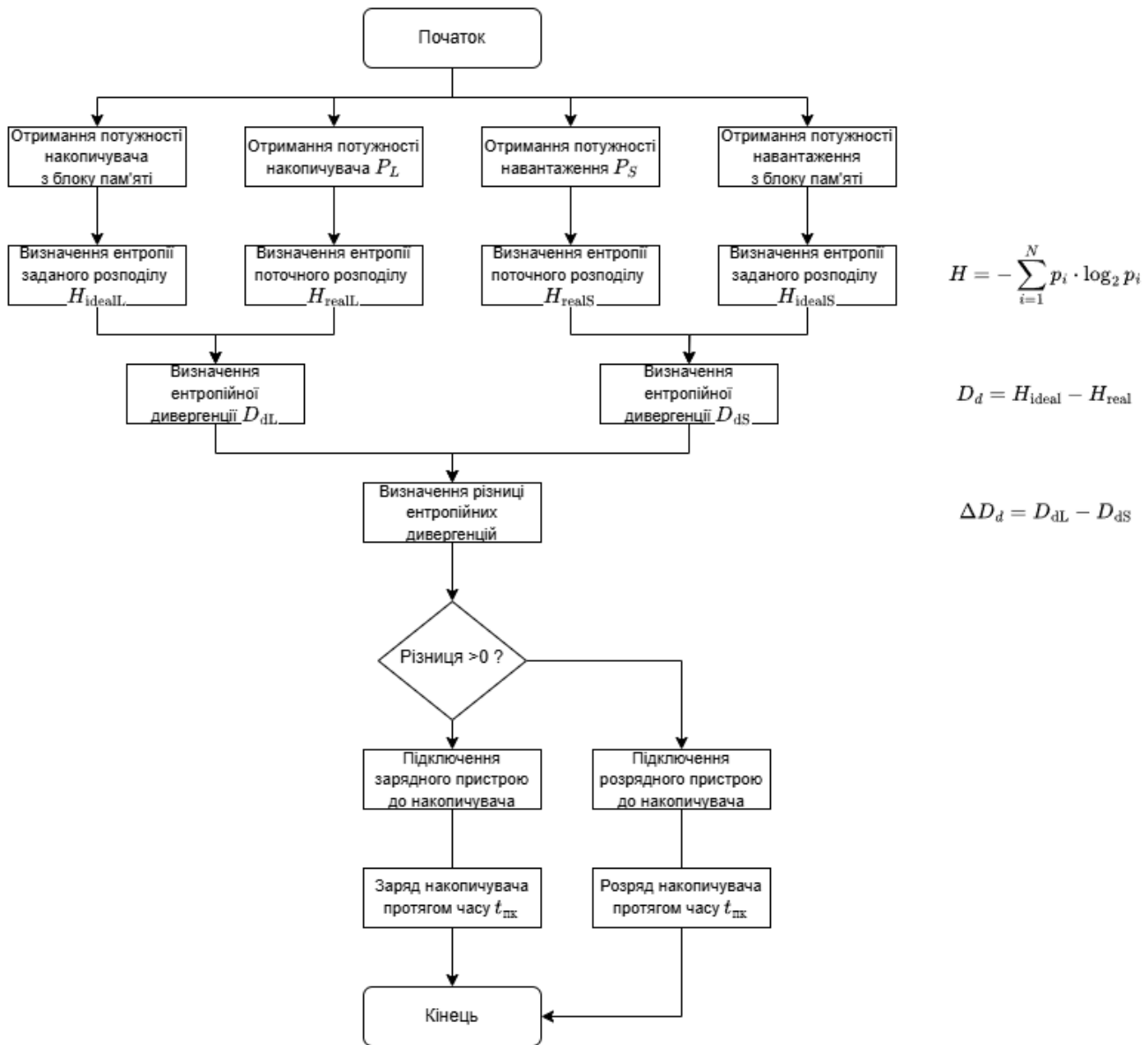


Рис. 25. Блок-схема алгоритму керування комутатором зарядно-розрядного пристрою накопичувача

Складність алгоритму є лінійною і прямує до $O(N)$, тому час його роботи залежить лише від кількості доданків у формулі розрахунку ентропії Шеннона при розрахунку ентропійної дивергенції та частоти роботи процесора.

У шостому розділі визначено перспективи використання новітніх засад керування процесами генерації, накопичення та споживання енергії у локальних системах електроживлення з установками на основі відновлюваних джерел енергії, які дають змогу врахувати модернізацію інфраструктури існуючих систем, а також реалізувати протидію негативним явищам.

У локальних системах електроживлення аналог принципу невизначеності Гейзенберга, принцип синергетичного розвитку та принцип когнітивності керування визначають логіку побудови і роботи загального керування, в якому виділено п'ять рівнів ієрархії (табл. 2).

Таблиця 2. Рівні ієрархії керування в локальних системах електроживлення

Рівень ієрархії		Об'єкт керування	Стратегія керування
1	Централізоване керування	Пристрої перетворення параметрів електричної енергії	Керування за задаючими впливами
2	Централізоване, децентралізоване керування	Технічні системи перетворення параметрів електричної енергії	Керування режимами роботи, параметрами, стійкістю
3	Контекстно-залежне керування	Розумні будинки, Micro Grid	Прийняття рішень щодо режимів роботи, задаючих впливів, рівня комфорту
4	Великі дані, контекстно-залежне керування	Великі системи Micro Grid, частина великої системи	Прийняття рішень щодо станів вузлів, зв'язків, тарифів
5	Преемптивне керування	Великі і малі Smart Grid	Керування станом вузлів, зв'язків, тарифів, заборона на прийняття рішень

Перший рівень відповідає керуванню станом окремих пристроїв генерації, розподілення, перетворення і накопичення електроенергії. Системи керування цього рівня задають алгоритми роботи силового обладнання, що забезпечує необхідні параметри електричної енергії.

Другий рівень відповідає керуванню групою спільно працюючих силових пристроїв в системах з багатоконтурними зворотними зв'язками, що визначають режими роботи, вид характеристик, умови стійкої роботи системи при підтримці заданих параметрів електроенергії на навантаженнях із забезпеченням необхідного рівня комфорту.

Третій рівень ієрархії відповідає реалізації контекстно-залежного керування, заснованого на застосуванні: 1) мікропроцесорних систем керування; 2) методів обробки поточкових даних; 3) операційних додатків; 4) інтелектуальних датчиків: параметрів електроенергії; потоків первинної енергії; довкілля та середовища існування. Таке керування реалізують за умови інтеграції систем трансферу електроенергії та інформаційних систем, що забезпечує взаємодію енергетичної та інформаційної платформ відповідно до концепції Micro Grid. На прийняття рішення по керуванню впливають три складових: по-перше, це контекст, що відображає реальний поточний стан системи; по-друге, це особа, яка приймає рішення опосередковано шляхом виконання раніше встановлених в системі програм, що забезпечують реалізацію сценаріїв керування залежно від отриманого контексту; по-третє, це особа, яка приймає рішення безпосередньо шляхом прямого впливу індивідуума на поточний стан системи з метою продажу надлишку енергії, її накопичення і використання для забезпечення особистих комфортних умов.

Побудову систем **четвертого рівня** засновано на спільному застосуванні теорії великих даних, контекстно-залежного керування і встановлених операційних додатків, розрахованих на ефективне використання енергії та сталої роботи системи в цілому. При цьому опосередковано використовують знання особи, яка приймає рішення, реалізовані у встановлених операційних додатках з подальшим коректуванням в результаті накопичення знань про соціально-технічні процеси, що відбуваються.

Протидія негативним явищам досягається застосуванням системи керування **п'ятого рівня** ієрархії, яка реалізує принцип преємптивного керування соціально-технічною системою.

При цьому преємптивне керування забезпечує:

- 1) зміну та/або встановлення нового режиму взаємодії на третьому і четвертому рівнях ієрархії по генерації, обміну та накопиченню енергії;
- 2) формування на цих рівнях нових зв'язків і відносин з включенням нових операційних додатків;
- 3) досягнення стійких відносин на основі нових і відкоригованих операційних додатків і правил взаємодії.

Якщо в процесі подальшої роботи система може підійти до критичної точки, преємптивне керування не чекає і не визначає цього стану, а реалізує випереджуючим чином усунення загрози руйнування системи і локалізацію технічних об'єктів, що породжують загрозу, тобто відбувається перезавантаження системи після деякого часу тривалої роботи, під час якої реалізується прогнозне контекстно-залежне керування системою.

Таким чином, реалізація преємптивного керування на всіх рівнях ієрархії дає змогу вносити глобальні зміни у структуру зв'язків та відносин у локальних системах електроживлення. Врахування соціального, технічного та особистісного аспектів преємптивного керування дозволяє забезпечити позитивний соціальний розвиток соціально-технічної структури та блокування негативних впливів окремих індивідуумів або соціальних груп на етапах формування енергоінформаційної платформи, контролю стану окремих об'єктів і керування тарифами.

Практичне використання установок на основі відновлюваних джерел енергії вимагає модернізації інфраструктури існуючих систем електроживлення, для чого доречно об'єднати електротехнічне обладнання в єдину систему, що здійснюється на енергетичному рівні за допомогою перетворювачів електричної енергії, а на інформаційному – обміном різнотипної інформації, яку використовують для керування локальною системою електроживлення і представляють у формі контексту.

Контекст дозволяє описати можливі стани локальної системи електроживлення і окремих її підсистем та пристроїв з використанням апарату дескриптивної логіки у формі триплетів параметр-атрибут-значення, наприклад «Генератори: потужність = достатня», «Навантаження: характер = активно-індуктивний», «Приміщення: температура: = комфортна». Використання контексту зменшує обсяг оброблюваних та вимірюваних даних, підвищує ефективність керування локальною системою електроживлення та дозволяє

використовувати знання експертів для керування системою у вигляді правил. Використання правил зменшує кількість параметрів, які використовують для формування задаючих впливів для пристроїв локальної системи електроживлення, і обсяг даних, які циркулюють в системі. Інтеграція в контекст інформації, що надходить від різнотипних ВДЕ, накопичувачів та споживачів, дає змогу отримати модель поточного стану реальної системи електроживлення, на підставі якої системою керування може бути згенеровано необхідне керуюче рішення для перетворювачів параметрів електричної енергії з множини можливих рішень.

Процес керування системою електроживлення забезпечується постійною циркуляцією інформації, що з одного боку є контекстними даними та обчисленими інтегральними показниками, а з іншого боку – задаючими сигналами, які найчастіше є часовими рядами миттєвих значень потужності регульованих джерел енергії і окремих перетворювачів.

Для раціонального керування процесами генерації, накопичення та споживання енергії у локальних системах електроживлення з установками на основі відновлюваних джерел енергії необхідно проводити аналіз режимів роботи окремих пристроїв системи генерування енергії та вплив на них параметрів контексту.

Вирішенням задачі сумісної взаємодії пристроїв перетворювальної техніки, підключених до накопичувачів, що мають декілька режимів роботи, для забезпечення ефективного використання електричної енергії в локальних системах електроживлення, є застосування теорії ігор, що описує взаємодію автоматів, які знаходяться в спільному середовищі. В цьому випадку системи керування накопичувачами являють собою кінцеві автомати, що утворюють інформаційне середовище, взаємодіють з ним, та адаптують режим роботи накопичувачів відповідно до сигналів середовища шляхом керування перетворювачами. При цьому кожен стан автомата характеризується відповідним значенням ентропійної дивергенції. Розглядаючи процес функціонування локальної системи електроживлення як гру з ненульовою сумою, підвищення ефективності роботи системи не обов'язково досягають за умови реалізації стратегії з найменшим програшем для кожного окремого пристрою. Ефективне керування накопичувачем енергії дозволить зменшити кількість енергії, що протікатиме через нього при подвійному перетворенні на заряд та розряд, і відповідно призведе до зменшення втрат енергії.

ВИСНОВКИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

У роботі вирішена актуальна науково-прикладна проблема підвищення ефективності використання енергії у локальних системах електроживлення з установками на основі відновлюваних джерел енергії на основі розробки теоретичних засад керування напівпровідниковими перетворювачами, заснованих на аналогові принципу невизначеності Гейзенберга, ентропійному аналізі потоків первинної енергії та енергії споживання з врахуванням їх подвійної структури та фрактальної природи.

1. Обґрунтовано необхідність створення математичних основ ефективного керування перетворювачами у локальних системах електроживлення з

врахуванням подвійної структури потоків енергії. Проведений аналіз довів, що перспективним напрямком дослідження є розвиток теорії ентропійного аналізу із залученням положень теорії фрактального аналізу, моментних перетворень та теорії мартингалів.

2. На основі врахування аналогу принципу невизначеності Гейзенберга для ефективного керування локальною системою електроживлення реалізовано інтервальне керування перетворювачами: на базовому інтервалі для забезпечення необхідного рівня енергії для заряду накопичувача та на інтервалі спостереження для забезпечення необхідного рівня максимально можливої енергії, що отримується від установок на основі відновлюваних джерел.

3. Доведено, що при випадковому характері підключення навантаження або зміни потужності джерела енергії на інтервалі спостереження флуктуації електромагнітних процесів у локальній системі електроживлення відповідають Вінеровському процесу, що переводить систему до режиму нестійкої роботи.

4. Застосування теорії моментів для побудови відновлюючого та прогнозуючого поліному дозволяє з похибкою, що не перевищує 23% виконувати прогнозування часового розподілу ентропії Шеннона для потужності споживання. Підвищення точності прогнозування на 11% досягається шляхом врахування фрактальної природи процесу споживання енергії та використання при розрахунках ентропії Реньї.

5. Запропонований метод об'єднання найближчих сусідів та кластеризації k-середніх дозволяє досягти більшої точності прогнозування потужності генерації сонячних батарей порівняно з класичним методом найближчих сусідів, і зменшити середню абсолютну похибку у відсотках до 4%.

6. Розроблений метод керування функцією зарядного струму накопичувачем у локальній системі електроживлення на основі розрахунку ентропійної дивергенції потоку енергії на його виході дає змогу на 3% підвищити ефективність його використання за рахунок зменшення тривалостей інтервалів часу, коли накопичувач повністю заряджений та повністю розряджений.

7. Врахування стохастичного характеру потоків енергії генерації та споживання, а також їх статистичну залежність призводить до необхідності розрахунку ентропії Реньї, умовної ентропії поточних розподілів потоків енергії генерації та споживання та ентропії перезаряду та надмірного розряду накопичувача.

8. Застосування теорії мартингалів дає змогу оцінити кількість енергії, яка може виявитись надмірною при заряді накопичувача та кількість енергії, яка може виявитись недостатньою при його розряді накопичувача, та визначити імовірності його перезаряду та надмірного розряду за умови відсутності BMS-системи.

9. Комп'ютерне дослідження електромагнітних процесів у локальній системі електроживлення з сонячною батареєю як установки на основі відновлюваного джерела енергії та накопичувачем за програмного пакету Matlab R2023a Simulink підтвердило правочинність використання запропонованих математичних моделей.

10. Розроблене програмне забезпечення дає змогу виконувати прогнозне керування зарядно-розрядним пристроєм накопичувача у локальній системі

електроживлення з установками на основі відновлюваних джерел енергії на основі розрахунку різниці ентропійних дивергенцій зі сторони джерела та навантаження та формувати сигнал керування комутатором зарядно-розрядного пристрою в залежності від знаку алгебраїчної різниці.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографія:

1. В.Я. Жуйков, Л.М. Лук'яненко, Д.А. Миколаєць, К.С. Осипенко та ін. Підвищення ефективності систем з відновлюваними джерелами енергії. – К.: Кафедра, 2018. – 368 с. ISBN 978-617-7301-48-5. *(Здобувачем розроблено принципи керування напівпровідниковими перетворювачами у локальних системах електроживлення на основі використання аналогу принципу невизначеності Гейзенберга)*

Публікації у фахових виданнях:

2. Жуйков В.Я., Клен (Осипенко) К.С. Принцип невизначеності Гейзенберга при оцінці рівня енергії, що генерується відновлюваними джерелами. – Технічна електродинаміка. – 2017. – № 1. С. 10-16. *(Здобувачем запропоновано принцип інтервального керування системою електроживлення)* (Scopus)

3. Клен К.С., Жуйков В.Я. Вплив статистичного характеру параметрів елементів системи на рівень заряду накопичувача. – Технічна електродинаміка. – 2019. – № 1. С. 16-20. *(Здобувачем запропоновано при синтезі законів керування враховувати статистичну залежність функцій потужності на виході відновлюваного джерела енергії та навантаження)* (Scopus)

4. Клен К.С., Жуйков В.Я. Вплив стохастичного характеру енергії в системах розосередженої генерації на їхню стійкість. – Технічна електродинаміка. – 2020. № 3. С. 62-68. *(Здобувачем доведена відповідність флуктуацій потоків енергії у системі електроживлення Вінеровському процесу)* (Scopus)

5. Клен К.С., Жуйков В.Я. Ентропійний аналіз систем розосередженої генерації. – Вісті вищих учбових закладів. Радіоелектроніка – 2021. Том 64(10). С. 644–656. *(Здобувачем запропоновано керування накопичувачем здійснювати на основі розрахунку функції ентропійної дивергенції)* (Scopus)

6. Клен К.С., Седяров Є.В. Алгоритм підвищення точності прогнозування вихідної потужності сонячної електростанції при застосуванні методу найближчих сусідів. – Вісник НТУУ «КПІ». Серія радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2024. №95. С. 1-9. *(Здобувачем запропоновано для прогнозування потужності на виході сонячної батареї використовувати метод кластеризації)* (Web of Science)

7. Жуйков В.Я., Клен (Осипенко) К.С. Лінеаризація функції зміни параметрів потоку первинної енергії дискретними функціями Франкліна. – Електроніка та зв'язок. – 2016. Том 21, №4(93). С. 33-37. *(Здобувачем застосовано математичний апарат функцій Франкліна для апроксимації функцій зміни потоків первинної енергії)*

8. V. Zhuikov, K. Klen (Osypenko) Approximation of equivalent source parameters change function by Franklin functions. – Computational problems of electrical engineering. – 2016. Vol. 6, No. 1. P. 49-54. *(Здобувачем застосовано*

математичний апарат функцій Франкліна для відновлення функцій зміни потоків первинної енергії)

9. Клен (Осипенко) К.С. Визначення віртуальної щільності хмар із застосуванням методу зворотного перетворення. – Електроніка та зв'язок. – 2017. Том 22, №3(98). С. 55-60.

10. Жуйков В.Я., Клен (Осипенко) К.С. Оцінка фрактальної розмірності та передавальної функції хмар. – Мікросистеми, електроніка та акустика. – 2017. Том 22, №5. С. 13-19. *(Здобувачем запропоновано використання віртуальної щільності як інтегральної оцінки зміни параметрів хмарного покриву)*

11. V. Zhuikov, K. Klen (Osypenko) Principle of preemptive control in Smart Grid. – Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2017. – № 3 (49). С. 50-54. *(Здобувачем розроблено принцип преємптивного керування локальною системою електроживлення)*

12. V. Zhuikov, K. Klen (Osypenko) Determination of cloud cover parameters. – Computational problems of electrical engineering. – 2017. Vol. 7, No. 2. P. 97-102. *(Здобувачем запропоновано використання передавальної функції хмар як інтегральної оцінки зміни параметрів хмарного покриву)*

13. Клен (Осипенко) К.С. Розрахунок імовірності отримання енергії заряду/розряду акумулятора на основі використання теорії мартингалів. – Мікросистеми, електроніка та акустика. – 2018. Том 23, №2(103). С. 37-41.

14. Клен К.С., Куцаченко Є.Р. Імітаційне моделювання руху проєкцій хмар над площиною сонячної електростанції. – Мікросистеми, електроніка та акустика. – 2018. Том 23, №6. С. 42-47. *(Здобувачем розглянуто особливості впливу параметрів хмарного покриву на величину енергії, що отримується від сонячних батарей)*

15. Клен К.С., Мартинюк В.І. Лінійні функції на базі функцій Уолша. – Мікросистеми, електроніка та акустика. – 2019. Том 24, №1. С. 29-34. *(Здобувачем застосовано математичний апарат лінійних функцій на базі функцій Уолша для апроксимації та відновлення функцій зміни потоків первинної енергії)*

16. Клен К.С., Яременко М.К. Оцінка рівня енергії вітрового потоку за супровідними даними. – Мікросистеми, електроніка та акустика. – 2019. Том 24, №2. С. 56-63. *(Здобувачем запропоновано для прогнозування потужності на виході вітрогенератора використовувати методи кореляційного аналізу)*

17. Клен К.С., Жуйков В.Я., Корчака М.О. Відновлення даних у Micro Grid методом емпіричних ортогональних функцій. – Мікросистеми, електроніка та акустика. – 2019. Том 24, №3. С. 33-38. *(Здобувачем запропоновано використання математичного апарату емпіричних ортогональних функцій для відновлення даних потужності сонячного випромінювання)*

18. Клен К.С., Жуйков В.Я., Сукач Р.В. Програма для моделювання хмарного покриву над сонячною електростанцією. – Мікросистеми, електроніка та акустика. – 2019. Том 24, №4. С. 18-24. *(Здобувачем розроблено програмне забезпечення для моделювання хмарного покриву)*

19. K. Klen, V. Martynyuk, M. Yaremenko. Prediction of the wind speed change function by linear regression method. – Computational problems of electrical engineering. – 2019. Vol. 9, No. 2. P. 28-33. *(Здобувачем запропоновано для*

прогнозування потужності на виході вітрогенератора використовувати методи регресійного аналізу)

20. Клен К.С., Мартинюк В.І., Жуйков В.Я. Моделювання хмарного покриття на основі супутникових знімків. – Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. – 2020. – № 56. С. 24-27. *(Здобувачем запропоновано проводити моделювання хмарного покриття на основі супутникових знімків)*

21. Клен К.С., Яременко М.К., Жуйков В.Я. Вибір методу прогнозування потужності заряду/розряду накопичувача у системі з вітрогенератором. – Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. – 2020. № 57. С. 35-41. *(Здобувачем запропоновано для прогнозування потужності заряду/розряду накопичувача використовувати методи регресійного аналізу)*

22. Клен К.С., Збронський О.Г., Жуйков В.Я. Розрахунок віртуальної щільності хмари на основі перетворення Фур'є. – Мікросистеми, електроніка та акустика. – 2020. Том 25, №3. С. 36-40. *(Здобувачем запропоновано для розрахунку віртуальної щільності хмар використовувати перетворення Фур'є)*

23. Клен К.С. Перша вибірка ентropія як функція стану системи розосередженої генерації. – Мікросистеми, електроніка та акустика. – 2021. Том 26, №1. С. 288315-1 – 288315-6.

24. Мартинюк В.І., Клен К.С., Жуйков В.Я. Визначення параметрів схем заміщення сонячних панелей за експериментальними даними. – Мікросистеми, електроніка та акустика. – 2021. Том 26, №2. С. 237316-1 – 237316-9. *(Здобувачем розглянуто особливості визначення параметрів схем заміщення сонячних батарей)*

25. Яременко М.К., Клен К.С., Жуйков В.Я. Вплив величини похибки прогнозування швидкості вітру на вибір кількості акумуляторів системи балансування. – Мікросистеми, електроніка та акустика. – 2021. Том 26, №3. С. 237245-1 – 237245-7. *(Здобувачем описана залежність ширини зони керованої роботи акумулятора від величини похибки прогнозування)*

26. Клен К.С., Марченко Р.С. Прогнозування потужності навантаження у MicroGrid методом множинної регресії. – Мікросистеми, електроніка та акустика. – 2022. Том 27, №1. С. 236697–1 – 236697–7. *(Здобувачем запропоновано для прогнозування потужності навантаження використовувати методи регресійного аналізу)*

27. Клен К.С., Мирошніченко М.В. Прогнозування потужності на виході сонячної панелі. – Мікросистеми, електроніка та акустика. – 2022. Том 27, №2. С. 237737–1 – 237737–5. *(Здобувачем запропоновано для прогнозування потужності на виході сонячної батареї використовувати методи регресійного аналізу)*

28. Клен К.С., Андрієнко Р.Є. Імітаційне моделювання автономної системи електроживлення на основі сонячних панелей в режимі реального часу. – Мікросистеми, електроніка та акустика. – 2022. Том 27, №3. С. 268903-1 – 268903-7. *(Здобувачем розроблена модель автономної системи електроживлення з сонячною батареєю)*

29. Клен К.С., Яременко М.К. Вплив зміни потужності вітру та потужності навантаження на ємність системи балансування. – Мікросистеми, електроніка та

акустика. – 2023. Том 28, №3. С. 290932.1–290932.9. *(Здобувачем розроблено метод врахування впливу потужності вітроустановки на розмір накопичувача для балансування енергії в системі)*

30. Клен К.С., Навроцький В.О., Жуйков В.Я. Simulation modeling of the power supply system taking into account the stochastic nature of energy generation and consumption processes. – Computational problems of electrical engineering. – 2023. Vol. 13, No. 2. P. 15 – 22. *(Здобувачем запропоновано принцип керування накопичувачем з врахуванням стохастичного характеру потоків енергії генерації та споживання)*

Публікації у міжнародних виданнях:

31. Kateryna Klen, Valery Zhuikov. Approximation and prediction of wind speed change function. – Present problems of power system control. Autumn 2018. P. 35-47. *(Здобувачем розглянуто особливості керування накопичувачем у системі електроживлення з вітрогенератором)*

32. K. Klen, V. Martynyuk, M. Yaremenko. Prediction of primary energy flow considering its stochastic nature. – Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe Nr 1/2021 (125). P. 107-110. *(Здобувачем запропоновано враховувати стохастичний характер потоку первинної енергії при його прогнозуванні)*

33. K. Klen, M. Yaremenko. Influence of the expected wind speed fluctuation on the number of batteries of the balancing system. – Power Electronic and Drives, vol. 7 (42), 2022. P. 187-196. *Здобувачем розроблено метод врахування впливу потужності вітроустановки та потужності навантаження на розмір накопичувача для балансування енергії в системі (Web of Science)*

Матеріали конференцій:

34. K. Klen, V. Martynyuk. Estimation of Parameters of Photovoltaic Modules Based on Ideality Factor Variation. – 2022 IEEE 41st International Conference on Electronics and Nanotechnology, ELNANO 2022 – Proceedings, 2022. P. 692–696. *(Здобувачем запропоновано врахування зміни коефіцієнту ідеальності при розрахунку параметрів сонячних батарей)*

35. K. Klen, M. Yaremenko. The Effect of Wind Speed Change on the Payback Period of Batteries. – 2022 IEEE 41st International Conference on Electronics and Nanotechnology, ELNANO 2022 – Proceedings, 2022. P. 667–671. *(Здобувачем запропоновано врахування впливу зміни швидкості вітру на строк служби накопичувачів)*

36. K. Klen, Y. Sedliarov. Selection of the K Parameter in the K-Nearest Neighbor Algorithm for Solar Power Prediction. – Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo) – Proceedings, 2023. P. 306-311. *(Здобувачем запропоновано для прогнозування потужності на виході сонячної батареї використовувати метод k-середніх)*

АНОТАЦІЯ

Клен К.С. Теоретичні засади побудови систем керування перетворювачами на базі ентропійної дивергенції. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за

спеціальністю 05.09.12 «Напівпровідникові перетворювачі електроенергії». – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2025.

У дисертаційній роботі отримала подальший розвиток теорія керування напівпровідниковими перетворювачами, які є невід’ємною частиною сучасних локальних систем електроживлення, заснована на аналогові принципу невизначеності Гейзенберга, ентропійному аналізі потоків первинної енергії та енергії споживання з врахуванням їх подвійної структури та фрактальної природи. Доведено, що врахування вказаних особливостей при побудові систем керування напівпровідниковими перетворювачами дозволяє підвищити загальну ефективність локальних систем електроживлення. Отримані результати у сукупності є теоретичним узагальненням та новим вирішенням важливої науково-прикладної проблеми підвищення ефективності використання енергії первинного потоку у локальних системах електроживлення з напівпровідниковими перетворювачами.

Показано, що на основі врахування аналогу принципу невизначеності Гейзенберга для ефективного керування локальною системою електроживлення необхідно мати два канали керування. Обґрунтовано, що при випадковому характері підключення навантаження або зміни потужності джерела енергії на інтервалі спостереження флуктуації електромагнітних процесів у локальній системі електроживлення відповідають Вінеровському процесу. Обґрунтовано застосування інтегральних оцінок зміни параметрів системи, що не потребують значної кількості обчислень для зниження розмірності простору даних зі збереженням корисної інформації про систему. Показано, що врахування фрактальної природи процесів генерації та споживання енергії дозволяє підвищити точність прогнозування потужності генерації та споживання у локальних системах електроживлення.

Показано, що реалізація прогнозного керування локальною системою електроживлення з використанням першої вибіркової ентропії дає змогу оцінювати та порівнювати випадкові процеси генерації, споживання та накопичення енергії, не знаходячи законів їх розподілу. Наведено формули теорії моментів для побудови відновлюючого та прогнозуючого поліному потужності споживання. Для прогнозування потужності на виході сонячних батарей запропоновано новий метод об’єднання найближчих сусідів та кластеризації k -середніх, який дає змогу в середньому на 25% зменшити похибку прогнозування. Запропоновано спосіб керування зарядно-розрядним пристроєм накопичувача на основі використання функції ентропійної дивергенції, який дав змогу на 3% підвищити ефективність використання накопичувача за рахунок зменшення тривалостей інтервалів часу, коли накопичувач повністю заряджений та повністю розряджений.

Проаналізовано вплив подвійної структури потоків енергії генерації та споживання на розрахунок ентропійної дивергенції. Врахування статистичної залежності функцій зміни енергії на виході відновлюваного джерела енергії та навантаження вказує на необхідність використання для розрахунку ентропійної дивергенції умовної ентропії для поточних розподілів потоків енергії генерації та

споживання. Показано, що для забезпечення ефективної роботи накопичувача, в якому ширина зона керованої роботи визначається величиною похибки прогнозування швидкості вітру, необхідно отримувати дані з меншою дискретністю та обирати метод прогнозування швидкості вітру, що забезпечує мінімальну похибку прогнозування. Наведено формули для розрахунку імовірностей перезаряду та надмірного розряду накопичувача з використанням теорії мартингалів.

Описано новий спосіб керування зарядно-розрядним пристроєм накопичувача електроенергії у локальній системі електроживлення, заснований на визначенні різниці ентропійних дивергенцій зі сторони джерела та навантаження, що дозволяє зменшити тривалості інтервалів часу, коли накопичувач є повністю зарядженим або розрядженим. Для реалізації вказаних особливостей керування розроблено програмне забезпечення, що дає змогу реалізувати керування локальною системою електроживлення на основі розрахунку ентропійної дивергенції.

Визначено перспективи використання новітніх засад керування процесами генерації, накопичення та споживання енергії у локальних системах електроживлення з установками на основі відновлюваних джерел енергії, які дають змогу врахувати модернізацію інфраструктури існуючих систем, а також реалізувати протидію негативним явищам.

Результати роботи використано для вдосконалення програми прогнозування генерації електричної енергії сонячними фотоелектричними станціями ТОВ «Пролог Соларінвест» та ТОВ «Енерджилайн» та для створення методик і рекомендацій щодо підвищення ефективності використання електроенергії в системах з установками на основі відновлюваних джерел енергії громадською організацією «Асоціація науковців України». Також результати досліджень застосовано у дисциплінах «Теорія інформації», «Пристрої перетворювальної техніки», «Електронні системи керування та регулювання» при підготовці фахівців за спеціальністю 171 «Електроніка» в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Ключові слова: аналог принципу невизначеності Гейзенберга, Вінеровський процес, ентропійний аналіз, локальні системи електроживлення, перетворювачі електроенергії, фрактальний аналіз.

SUMMARY

Klen K.S. Theoretical principles of construction of converter control systems based on entropy divergence. – Manuscript. The dissertation of doctor of technical sciences on a specialty 05.09.12 “Semiconductor power converters”. – National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, 2025.

In the dissertation work, the theory of semiconductor power converters control, which are an integral part of modern local power supply systems, was further developed, based on the Heisenberg uncertainty principle analog, entropic analysis of primary energy flows and energy consumption, taking into account their dual structure

and fractal nature. It is proven that taking into account the specified features when constructing semiconductor converters control systems allows to increase the overall efficiency of local power supply systems. The obtained results as a whole are a theoretical generalization and a new solution to an important scientific and applied problem of increasing the efficiency of primary flow energy use in local power supply systems with semiconductor power converters.

A new method of control the charging and discharging device of an electricity storage device in a local power supply system is described, based on determining the difference in entropy divergences from the source and load sides, which allows reducing the duration of time intervals when the storage device is fully charged or discharged.

The results of the work were used to improve the program for predicting the generation of electricity by solar photovoltaic stations of Prolog Solarinvest LLC and Energyline LLC and to create methods and recommendations for increasing the efficiency of electricity use in systems with installations based on renewable energy sources by the public organization “Association of Scientists of Ukraine”. The research results were also applied in the disciplines “Theory of Information”, “Power Converters”, “Electronic systems for operation and control” in the training of specialists in specialty 171 Electronics at the National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”.

Keywords: entropy analysis, fractal analysis, Heisenberg uncertainty principle, local power supply systems, semiconductor power converters, Wiener process.

Наклад 100. Папір офсетний. Ум.-др. арк. 1,9.
Підписано до друку 03.04.2025. Замовлення 149.

Надруковано в «МП Леся».
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру
суб'єктів видавничої справи серія ДК № 892 від 08.04.2002.

«МП Леся»
03148, Київ, а/с 115.
Тел./факс: (066) 60-50-199, (098) 455-41-17
E-mail: lesya3000@ukr.net