

# SMART GRID СИСТЕМИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ

## SMART GRID SYSTEMS AND TECHNOLOGIES

УДК 620.9

DOI 10.20535/1813-5420.4.2023.290880

С.П. Денисюк<sup>1</sup>, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-6299-3680

К.М. Гілевич<sup>1</sup>, аспірантка, ORCID 0000-0001-9074-0683

<sup>1</sup>Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

### ОПТИМІЗАЦІЯ ВИКОРИСТАННЯ РОЗОСЕРЕДЖЕНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ РЕСУРСІВ В ЛОКАЛЬНИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ ЗА КРИТЕРІЄМ МІНІМУМУ ВТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

**Анотація.** Розглянуто питання оптимізації використання розосереджених енергетичних ресурсів в локальних електроенергетичних системах (ЛЕС) за критерієм мінімуму втрат електроенергії. Визначено, що важливим кроком оптимізації використання розосереджених енергетичних ресурсів в ЛЕС є розробка енергетичного роутера, який дозволяє на низькій напрузі об'єднувати в єдину систему пристрої, що генерують, накопичують і споживають електроенергію (без інтеграції в електричні мережі середньої напруги). Власне енергороутер може позиціонуватися як базовий пристрій, який забезпечує роботу ЛЕС, взаємодію сусідніх ЛЕС на рівні енергетичного та інформаційного обміну, інтеграцію конкретних ЛЕС до розподільних електричних мереж середньої напруги.

Показано, що базовою складовою оцінки ефективного функціонування енергороутерів та платформеного підходу в ЛЕС, відповідно до вимог Енергетичного Інтернету, є аналіз складових втрат електроенергії, вплив на їх рівні різних факторів, а також формування відповідних критеріїв енергоефективності та оцінки парціального впливу елементів ЛЕС. Запропоновано здійснювати опис енергетичних процесів при декомпозиції реактивної потужності Фризе з виділенням реактивного та активного струму в контрольованих перетинах системи. Розглянуто декомпозицію потужності  $Q_F$  на складові при дії різних причин (факторів) виникнення додаткових втрат електроенергії в ЛЕС, зокрема, обумовлених різними режимами роботи генераторів та навантажень ЛЕС (спектрами напруги та струму), як на періоді роботи системи, так і за довільний проміжок часу, що визначається технологічними факторами роботи системи.

Використання потужності Фризе дозволило з єдиних позицій врахувати процеси енергозабезпечення навантажень ЛЕС на змінному та постійному струмі, зокрема, для оцінки впливу сукупності різних факторів появи додаткових втрат електроенергії; співставлення втрат електроенергії для різних інтервалів часу через виділений контрольований перетин, коли напрямок потоку електроенергії є незмінним чи напрямок потоку електроенергії змінюється протягом окремих інтервалів часу; аналізу втрат електроенергії в системах постійного та змінного струму ЛЕС чи гібридних систем, де введено модифіковані потужності, як інтегральні оцінки нев'язки, яка визначає вплив спотворюючих факторів; оцінки впливу зміни напруги та струму в перетині ЛЕС обмеженої потужності на складові додаткових втрат; аналізу зміни споживання навантаженням активної потужності за першою гармонікою та за вищими гармоніками як інтегральними показниками.

**Ключові слова:** локальні електроенергетичні системи, розосереджені енергетичні ресурси, Енергетичний Інтернет, енергетичний роутер, енергетичні процеси, потужність Фризе, фактори спотворення енергоспоживання, складові втрат електроенергії, оптимізаційні процедури.

#### Вступ

Основною технічною проблемою, яка виникає при практичному використанні джерел розосередженої генерації (ДРГ) обмеженої потужності у складі ЛЕС, є узгодження режимів виробництва та споживання енергії [1 – 6]. Сумірність потужностей генеруючих джерел та споживачів в ЛЕС призводить до погіршення якості вихідної напруги в періоди піків електричного навантаження, неефективного використання ДРГ, включаючи й відновлювані джерела енергії (ВДЕ), що знижує загальний рівень надійності та стабільності електропостачання споживачів [7, 8]. Більшість наявних в експлуатації ЛЕС з ДРГ є технічно готовими виробами, адаптованими під певний тип енергетичного обладнання, які не допускають розширення їх функціональних можливостей та нарощування потужностей за рахунок підключення нових генеруючих установок [7, 8]. На ринку локальних електроенергетичних

систем виникла потреба в універсальних технічних пристроях, що забезпечують можливість об'єднання в рамках «Інтернет енергії» (Internet of Energy) різнотипних енергетичних установок з можливістю оцінки їх ефективності та оптимального (квазіоптимального) керування режимами їхньої роботи. Як наслідок, зазначена проблематика визначила актуальність вирішення науково-технічної проблеми ефективного застосування ЛЕС змінного та постійного струму [8, 9].

Одним із важливих кроків у напрямку розвитку Енергетичного Інтернету є розробка енергетичного роутера, який дозволяє на низькій напрузі об'єднувати в єдину систему пристрої, що генерують, накопичують і споживають електроенергію (без інтеграції в електричні мережі середньої напруги) [8–10]. Фактично енергороутер може позиціонуватися як базовий пристрій, який забезпечує роботу ЛЕС, взаємодію сусідніх ЛЕС (на одному ієрархічному рівні) на рівні енергетичного та інформаційного обміну, інтеграцію конкретних ЛЕС до розподільних електричних мереж середньої напруги.

Створення комбінованих ЛЕС з ДРГ, як постійного, так і змінного струму, вимагає вирішення науково-технічної проблеми оцінки ефективності передачі та перетворення електроенергії та керування цими процесами за певними законами, які забезпечують їхню високу енергетичну ефективність [10–12]. При цьому важливо проаналізувати характер протікання енергетичних процесів, які забезпечують можливість раціонального об'єднання у складі ЛЕС різнотипних ДРГ та формування ефективних режимів їх роботи залежно від зміни у часі доступної генерованої та споживаної потужності у випадку наявності широкого спектру технологій енергоспоживання, коли також є успішним застосування енергетичного роутера [8–10].

Важливим елементом оптимізації енергетичних процесів в ЛЕС є формування відповідної платформи взаємодії (керування), направленої на досягнення ефективності функціонування ЛЕС за дотримання балансу потужності при мінімізації втрат електроенергії. Можемо виділити наступні сценарії використання платформи в оперативному керуванні [13, 14]:

- 1) керування попитом (цінозалежне зниження споживання);
- 2) керування віртуальною електростанцією;
- 3) керування розосередженою системою накопичувачів;
- 4) комерційна диспетчеризація споживачів;
- 5) керування ЛЕС в цілому;
- 6) диспетчеризація парку станцій зарядки електротранспорту;
- 7) диспетчеризація ділянок Smart Grid;
- 8) керування ЛЕС з врахуванням вимог локальних енергоринків.

Платформенний підхід відкриває широкий спектр нових можливостей для підвищення якості керування інфраструктурою ЛЕС, її стійкості та надійності [11–13]. Так, система керування ЛЕС має забезпечити безперервний контроль її працеспроможності в умовах безперервної динаміки та постійних змін параметрів зовнішніх умов та, звичайно, з урахуванням факторів впливу. Крім класичних для електроенергетики задач оптимізації режимів електроенергетичних систем, вибору оптимального складу робочого обладнання або конфігурації мережі, ЛЕС вимагають вирішення завдань оптимального планування роботи також накопичувачів електроенергії, оцінки ризиків при керуванні попитом, оптимізації використовуваних агрегаторами ресурсів. Усі ці оптимізаційні завдання мають свою специфіку, зокрема [14–16]:

– формуються та вирішуються на різних часових проміжках: від кількох хвилин у завданнях керування потужністю при вторинному регулюванні частоти до тижнів і місяців у задачах планування експлуатації;

– мають різні критерії мінімізації реактивної потужності, втрат електроенергії у мережі, відхилень напруги від номінальних значень, сукупних витрат на генерацію, а також максимізації сукупного прибутку окремих учасників локальних енергоринків;

– включають різні набори і типи змінних (двійкові, цілочисельні, безперервні, лінгвістичні);

– наявність систем прогнозування.

При побудові високоефективних ЛЕС висуваються різні вимоги щодо точності та оперативності (від кількох секунд у завданнях оптимізації поточного функціонування ЛЕС до днів та місяців у завданнях планування складу клієнтів агрегаторів), зокрема, мають враховуватися [15–18]: керування складом та режимами роботи ДРГ; керування навантаженням; керування накопичувачами електроенергії. Для цього застосовуються:

1) засоби силової електроніки для керування реактивною потужністю та напругою, конфігурацією системи;

2) системи та об'єкти, зовнішні щодо ЛЕС, включаючи численні взаємні зобов'язання між учасниками – складні багатоставкові та мультizonні тарифи на електроенергію та потужність;

3) штрафи за відхилення від заявленого споживання;

4) зобов'язання щодо участі в наданні системних послуг тощо.

Також доцільно врахувати невизначеність майбутнього – різні сценарії зміни обсягів генерації,

споживання, ринкових цін та інших значимих параметрів.

Важливою складовою ефективного функціонування енергорутерів та платформеного підходу є аналіз складових втрат електроенергії, вплив на їх рівні різних факторів, формування відповідних критеріїв енергоефективності та парціального впливу елементів ЛЕС [18–21].

**Мета роботи.** Оцінка ефективності функціонування енергорутерів в ЛЕС, відповідно до вимог платформеного підходу і Енергетичного Інтернету, та аналіз складових втрат електроенергії, обумовлених роботою генераторів і навантажень з виділенням техніко-економічних (цінових) та технологічних факторів.

### **1. Особливості використання енергетичних роутерів в ЛЕС**

Впровадження великої кількості установок ВДЕ в ЛЕС згідно концепції Smart Grid, відомі як інтелектуальні мережі, докорінно змінить парадигму керування енергією. Ефективне керування попитом і пропозицією енергії в мережі вимагає енергетичних роутерів, які динамічно регулюють розподіл енергії в мережі, що можна назвати Енергетичним Інтернетом [5]. Енергетичний Інтернет можна визначити як інноваційний підхід до керування електроенергією, заснований на використанні інтелектуальних електричних мереж, які інтегрують виробництво, передачу, зберігання, споживання та ринки електроенергії [8].

Нижче представимо основні характеристики Енергетичного Інтернету, які обумовлюють особливості функціонування енергорутера [9]:

1. **Відкритий доступ.** Енергетичний Інтернет забезпечує платформу для відкритого доступу до різних видів енергії. Зберігання та використання розосереджених енергетичних ресурсів та пристроїв може здійснюватися локально в рамках Енергетичного Інтернету, а торгові платформи та ринки електроенергії в ньому є відкритими.

2. **Можливість взаємодії з різними енергетичними мережами.** Енергетичний Інтернет використовує електричну енергію як основне джерело енергії, але також інтегрує інші види, зокрема, хімічну та теплову енергію. Різні електроенергетичні мережі можуть бути поєднані в мережу Енергетичного Інтернету для забезпечення диверсифікованого споживання енергії.

3. **Розподіленість.** Енергетичний Інтернет характеризується широкомасштабною децентралізацією розосереджених енергетичних ресурсів та пристроїв зберігання енергії, які інтегруються в систему попиту. Це вимагає використання технологій розподіленого контролю та оптимального керування енергією, що забезпечує реалізацію інтелектуального керування енергією.

4. **Еквівалентність.** Енергетичний Інтернет порушує традиційну структуру електромереж, включаючи виробництво, передачу, розподіл та використання електроенергії. Він дозволяє виробникам та споживачам енергії взаємодіяти між собою без обмежень, оскільки виробництво та споживання енергії можуть бути багатосторонніми чи двонаправленими.

5. **Можливість спільного використання.** Енергетичний Інтернет забезпечує швидкий і точний обмін інформацією в режимі реального часу за допомогою передових комунікаційних технологій. В енергетичному інтернеті можна обмінюватися різними енергетичними параметрами, такими як напруга, струм і потужність, а також параметрами портів і розподілом потоків енергії.

Оскільки інтелектуальна електромережа є комплексною модернізацією існуючих енергетичних систем і включає в себе багато нових функцій, таких як використання ВДЕ та інтелектуальне керування енергоспоживанням, яке допомагає оптимізувати використання енергії, відповідно функціонал інтелектуальної мережі можна розділити на сім областей: генерація великої потужності, передача, розподіл, експлуатація, ринок, клієнти та постачальники послуг [6]. Енергетичний роутер є ключовим технологічним компонентом інтелектуальної мережі, який допомагає забезпечити її роботу.

Основні функції енергетичного роутера: керування потоками електроенергії розподільних електричних мереж 10, 20 кВ у мережу 0,4 кВ; керування потоками електроенергії в мережі 0,4 кВ (зі споживачами, розосередженою генерацією та пристроями накопичення); зв'язок з іншими енергорутерами для об'єднання ЛЕС у Smart Grid; передача надлишків електроенергії з мережі 0,4 кВ із ДРГ в розподільні електромережі 10, 20 кВ. Керування потоками електроенергії передбачає: передача та розподіл електроенергії з району електромереж 10, 20 кВ споживачам 0,4 кВ; передача електроенергії споживачам 0,4 кВ та накопичувачам електроенергії; передача (продаж) надлишків електроенергії від власних джерел іншим споживачам 0,4 кВ та накопичувачам електроенергії; передача (продаж) надлишків електроенергії від ДРГ та власних джерел у район електромереж 10, 20 кВ; використання електроенергії пристроїв накопичення.

Позитивні ефекти від впровадження енергорутерів [10–12]:

- електричні мережі (зниження пікових навантажень);
- споживачі, які мають труднощі з підключенням внаслідок енергодефіциту (отримання надлишку потужності для підключення нових споживачів);
- споживачі зі «складною» структурою мереж низької напруги (впорядкування процесів передачі,

розподілу та споживання електроенергії);

– застосування енергороутера в ЛЕС у мегаполісах (отримання надлишку потужності для підключення нових споживачів, підвищення надійності електропостачання, підвищення якості електроенергії, що відпускається);

– застосування енергороутера в районах з високим потенціалом ВДЕ (інтеграція ВДЕ в розподільні електромережі 10, 20 кВ, можливість споживачам здійснювати продаж електроенергії).

Використання енергетичних роутерів в мережах зі здатністю до інтелектуального керування розглянемо з використанням поняття «домен» у розумінні група чи множина [9 – 11]:

1. Домен генерації великої потужності передбачає собою виробництво електроенергії з розосереджених енергоресурсів, які зазвичай пов'язані з локальними навантаженнями. Електроенергія, що перевищує локальний попит, надходить до енергетичної системи через мережу енергетичних роутерів. Під час локального дефіциту енергії, мережа забезпечує достатні обсяги енергії через енергетичний роутер.

2. Домен передачі електроенергії забезпечує передачу електроенергії від джерел генерації до споживачів. Оскільки енергоресурси є розосередженими, домен передачі повинен за допомогою енергетичного роутера диспетчеризувати енергію від джерел, які мають надлишок після задоволення локальних потреб, з метою забезпечення динамічних енергетичних потоків.

3. Домен мережі розподілу електроенергії залежить від енергетичних роутерів, які забезпечують адаптацію розподілу енергії до змін попиту користувачів з часом.

4. Оптимізаційний домен енергетичної мережі необхідний для збору інформації про поточний стан мережі, включаючи потужності виробництва енергії з розосереджених джерел та потреби в енергії від різних споживачів. Цю інформацію можна отримати від енергетичних роутерів, які використовуються в операційних доменах передачі та розподілу електроенергії.

5. Ринковий домен спрямований на забезпечення балансу між попитом та пропозицією, інформація про попит та пропозицію електроенергії має бути зібрана з різних частин електроенергетичної системи, щоб забезпечити її належну роботу. Для цього необхідні енергетичні роутери, розгорнуті в електроенергетичній системі, які забезпечують збір необхідної інформації.

6. В домені споживача, споживачі отримують електроенергію через енергетичні роутери. Якщо споживачі також генерують електроенергію з ВДЕ, то енергороутери регулюють попит та пропозицію електроенергії для споживачів, які до них підключені. Якщо загальний обсяг електроенергії, вироблений споживачами, перевищує їхній власний попит, то надлишок може бути проданий назад в електромережу через енергетичні роутери, що допомагає автоматизувати ринкові процеси.

7. Домен постачальника послуг: для оптимізації своїх послуг постачальники повинні отримувати актуальну інформацію про попит та пропозицію електроенергії. Вони можуть отримати цю інформацію з власних об'єктів виробництва енергії або від сторонніх ВДЕ. Для збору інформації підключаються енергетичні роутери.

Можливі способи застосування енергетичного роутера в Енергетичному Інтернеті зображено схемою на рис. 1, де показано три типи застосування, а саме: ЛЕС, стандартні навантаження та електромобілі [22]. В лівій частині рис. 1 показано, що ЛЕС містить ВДЕ, таку як сонячна енергія та енергія вітру.

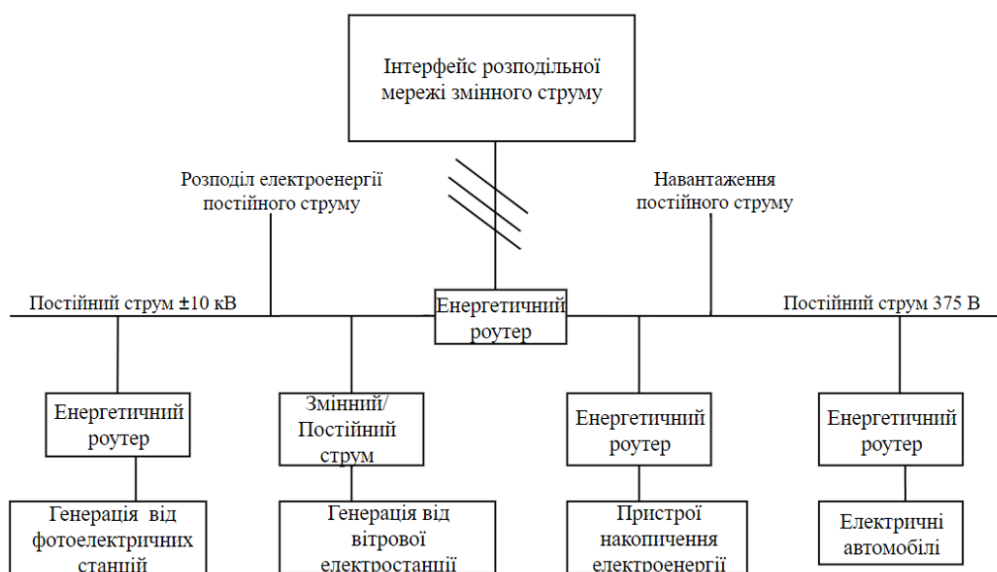


Рисунок 1 – Застосування енергетичного роутера в Енергетичному Інтернеті

За допомогою енергетичного роутера, що використовується для керування енергетичними потоками, ЛЕС може бути підключена до Енергетичного Інтернету [22]. У центральній частині рис. 1 зображено стандартні навантаження, такі як побутові електроприлади та промислові машини. Застосування енергетичного роутера дозволяє регулювати та контролювати енергетичний потік до стандартних навантажень для забезпечення ефективного використання енергії. У правій частині рис. 1 показано, що енергетичний роутер може бути використаний для зарядки електромобілів. Роутер може регулювати енергетичний потік до станцій зарядки електромобілів, щоб забезпечити ефективне та стабільне заряджання. Узагальнюючи можемо стверджувати, що рис. 1 демонструє потенційні застосування енергетичного роутера в різних сферах, допомагаючи забезпечити стабільну та ефективну роботу Енергетичного Інтернету [22].

При встановленні енергороутера у гібридній ЛЕС з АС / DC, яка містить вітрогенератор, сонячні панелі та звичайний дизель-генератор, основною функцією його є регулювання потоку електричної енергії між цими різними джерелами енергії та споживачами. Він також регулює накопичення надлишкової енергії, що була вироблена від вітрогенератора та сонячних панелей, у батареї для подальшого використання.

Енергетичний роутер є складовою інтелектуальної електромережі та відіграє ключову роль у контролі за електроенергією, що дозволяє ефективно керувати нею в електроенергетичній системі. Розробка цього пристрою потребує інтеграції технологій силової електроніки, передачі даних та автоматизації. Розглянемо нижче всі необхідні технічні аспекти при проектуванні енергетичного роутера [22, 23]. Для автоматичного розподілу та ефективного керування електроенергією в енергетичному роутері необхідним є застосування пристроїв силової електроніки. Ці пристрої «збирають» інформацію про попит та пропозицію електроенергії в режимі реального часу з мережі і динамічно коригують розподіл електроенергії в залежності від цієї інформації. Для цього силова електроніка використовується як інтерфейс між інтелектуальним модулем керування та силовим трансформатором в енергетичному роутері. Швидка та надійна робота пристроїв силової електроніки є необхідною умовою, щоб забезпечити правильне виконання команд, які видає інтелектуальний модуль керування [22, 23].

Також результат роботи енергетичного роутера залежить від того, які дані він отримує від мережі. Наприклад, при зростанні локального навантаження роутер може використовувати фотоелектричну систему для вироблення електроенергії, а коли пристрій не працює належним чином, то він вимикає її. Щоб забезпечити правильну роботу мережі, зв'язок між енергетичними роутерами має відповідати конкретним вимогам, наведеним нижче. Мінімізації затримки передачі даних. Необхідно забезпечувати швидку передачу даних між енергетичними роутерами, зокрема, затримка обміну даними має визначати максимальний час, за який повідомлення має досягти свого призначення. Вимоги до затримки в мережі можуть відрізнятися залежно від типу подій, що викликають ці повідомлення [23].

В інтелектуальних електричних мережах найбільш критичні за часом повідомлення потребують максимальної затримки доставки до 3 мс. Тому необхідно забезпечити енергетичному роутеру технічно швидку обробку та передачу даних для зменшення часового діапазону, як опрацювання даних, так і подальшої передачі. Наступним важливим етапом у програмуванні енергетичного роутера постає необхідність забезпечити надійний зв'язок між енергетичними роутерами, що досягається завдяки проектуванню роутерів з урахуванням мінімізації ймовірності збоїв.

Також необхідно забезпечити функцію виявлення збоїв зв'язку, що дозволяє швидко ретранслювати втрачені повідомлення для їх повторної передачі. Щоб забезпечити безпеку обміну даними між енергетичними роутерами, важливо задіяти належні механізми безпеки, які запобігатимуть несанкціонованому доступу та зміні інформації, що передається. Фальсифіковані або підроблені повідомлення можуть поставити під загрозу роботу електроенергетичної системи [22, 23].

Енергетичні роутери повинні мати модуль «розподіленого мережевого інтелекту», щоб приймати обґрунтовані рішення щодо керування енергією в мережі. Цей модуль використовує інформацію, зібрану за допомогою комунікаційного модуля, і визначає зміни в керуванні, які необхідно внести в мережу за допомогою співпраці енергетичних роутерів. Об'єднання та обробка розподіленої інформації про стан електричної мережі, зібраної від різних енергетичних роутерів, дозволяє приймати інтелектуальні рішення щодо керування мережею.

Як приклад на рис. 2 приведено структуру архітектури енергетичного роутера [8]. Як видно з рис. 2, архітектура енергетичного роутера може включати наступні складові [8]: головний блок керування, блок керування живленням та декілька блоків інтерфейс з різними джерелами енергії та споживачами. Головний блок керування отримує вхідні дані від декількох джерел енергії та визначає, яким чином маршрутизувати ці дані до споживачів енергії для забезпечення оптимального використання ресурсів. Блок керування живленням забезпечує регулювання вхідної напруги і струму для підтримки стабільної роботи усіх джерел та споживачів енергії. Кожен блок інтерфейсу взаємодіє з конкретним джерелом або споживачем енергії та забезпечує взаємодію між ним та головним блоком керування.

Базова архітектура енергетичного роутера складається з трьох модулів: вхідний модуль, модуль

маршрутизації та вихідний модуль. Вхідний модуль приймає електричний струм від джерел енергії та забезпечує перетворення цього струму в цифрові дані. Модуль маршрутизації забезпечує вибір шляху руху електроенергії з вхідного до вихідного модуля, з урахуванням вимог до мінімізації втрат енергії. Вихідний модуль забезпечує зворотне перетворення цифрових даних в електричний струм і передачу цього струму до приймачів енергії. Оскільки енергорouter має децентралізовану архітектуру, він може бути використаний для підключення різних типів джерел енергії, включаючи вітрові та сонячні електростанції, акумуляторні батареї та електромобілі.

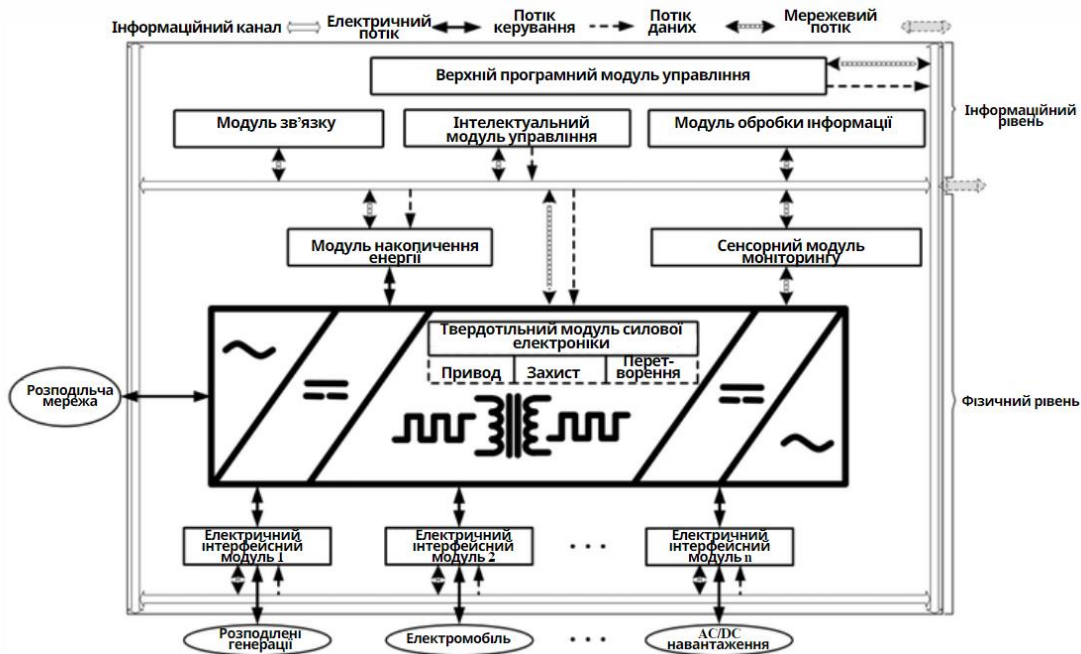


Рисунок 2 – Базова архітектура енергетичного роутера

Дані енергорouterи можуть забезпечувати підключення різні гібридні джерела живлення змінного / постійного струму з різними рівнями напруги, щоб задовольнити потреби споживачів. Для цього використовується схема підключення, яка включає кілька енергетичних роутерів. Енергетичні роутери, що належать одному споживачеві, можуть доповнювати один одного на основі типу порту та потужності, що може спростити структуру та зменшити розмір окремого пристрою енергетичного роутера [8]. Таким чином, основні переваги енергетичних роутерів [8]:

1. Наявність централізованої шини постійного струму дозволяє забезпечити ізоляцію несправностей та збоїв, які виникають на стороні електромережі та на стороні користувача, що забезпечує кожен енергетичний роутер та може постачати електроенергію з високою якістю та надійністю.

2. Розосереджена генерація може бути підключена до централізованої шини постійного струму через свій перетворювач, замість підключення безпосередньо до електромережі через свій власний перетворювач. Це дозволяє уникнути одного етапу перетворення струму з постійного на змінний, спрощує структуру перетворювача розосередженої генерації та зменшує втрати потужності в процесі перетворення.

3. Проблеми, пов'язані з відстеженням та керуванням мережею, а також забезпечення стійкості централізованої шини постійного струму, є актуальними лише для енергетичних роутерів, які підключені до мережі або використовують її для розосередженої генерації електроенергії, тому керування та структури інших енергетичних роутерів можуть бути спрощені.

4. Наявність акумуляторів для зберігання енергії забезпечує можливість постачання електроенергії споживачам системою з'єднання енергетичних роутерів, навіть у разі відмови комунальної електромережі (мережі розподілу). Таким чином, система з'єднання енергетичних роутерів має вищий рівень надійності електропостачання порівняно з традиційною розподільчою мережею.

5. Система взаємозв'язку енергетичних роутерів може регулювати потоки електроенергії, використовуючи акумуляторні батареї для накопичення та передачі надлишкової енергії розосередженої генерації під час великих навантажень. Це може підвищити самодостатність енергорouterів та допомогти досягнути вуглецевої нейтральності в розподільній мережі. Акумуляторні батареї гарантують, що система з'єднання енергетичних роутерів може постачати електроенергію споживачам, навіть якщо комунальна мережа виходить з ладу.

Представимо додаткові переваги системи з'єднання енергетичних роутерів декількох споживачів та

системи з'єднання енергетичних роутерів одного споживача [8]:

1. Локальний енергетичний роутер, який входить до складу багатофазного роутера на базі електроніки з вбудованим накопичувачем, може допомогти кожному споживачу зекономити на перетворювачі змінного / постійного струму, спрощуючи при цьому структуру побутових енергетичних роутерів та зменшуючи втрати електроенергії при перетворенні.

2. Акумуляторні батареї загального користування забезпечують додатковий рівень надійного енергопостачання. Наприклад, якщо енергетичний роутер одного споживача не оснащений акумулятором, то після відключення від електромережі він не зможе забезпечувати нормальну роботу. Але, якщо система об'єднання енергетичних роутерів декількох споживачів має акумуляторну батарею загального користування з достатнім рівнем заряду, то вона може забезпечити стабільну роботу всіх роутерів в системі, навіть якщо один з них вийшов з ладу через відключення від електромережі. Можна стверджувати, що система об'єднання енергетичних роутерів декількох споживачів є більш надійною для забезпечення електропостачання, ніж система з одним енергетичним роутером [8].

3. Включення менеджера з торгівлі енергією в систему з'єднання енергетичних роутерів декількох споживачів може уникнути прямого обміну енергією між споживачем та енергосистемою, що дозволяє зменшити залежність споживача від енергосистеми.

4. Зважаючи на відмінності у споживанні електроенергії різними споживачами, ті, які мають потребу купувати електроенергію, та ті, які мають можливість продавати електроенергію, можуть взаємодіяти в системі з'єднання енергетичних роутерів декількох споживачів для взаємовигідного співробітництва. Це підвищить місцевий рівень використання ДРГ та зменшить залежність споживачів від енергії з централізованої мережі.

5. Якщо в системі з'єднання енергетичних роутерів декількох споживачів буде впроваджено відповідний механізм внутрішньої цінової торгівлі, то це може сприяти стимулюванню виробництва та споживання електроенергії кожним споживачем, що дозволить підвищити рівень самодостатності системи з'єднання. Крім того, кожен споживач може купувати електроенергію за нижчою ціною або продавати її за вищою в системі з'єднання, що може збільшити прибуток кожного споживача.

Якщо розглядати систему з ВДЕ, то варто врахувати ризики непостійності потужності, тому енергороутер має забезпечувати оптимізацію генерації. Енергороутер, наприклад, дозволяє підключити сонячні панелі до головної електричної мережі системи розподілу та забезпечити ефективний розподіл електроенергії [22 – 24]. Крім того, енергороутер надає можливість використовувати електроенергію з інших джерел (наприклад, з мережі електропостачання), якщо генерація електроенергії від сонячних панелей була недостатньою. Використання енергороутера також дозволяє регулювати рівень напруги та потужності, що виробляється завдяки сонячним панелям, знизити вартість енергопостачання, оскільки забезпечує оптимальне використання енергії та зменшення залежності від зовнішньої електричної мережі, а також забезпечити додаткові послуги, такі як забезпечення резервної потужності або регулювання напруги та частоти мережі, що може бути використано для отримання додаткових доходів.

У конкретному випадку, наприклад, для ЛЕС на базі сонячних панелей, енергороутер забезпечує передачу енергії між сонячними панелями, акумуляторними батареями та споживачами відповідно до потреб. Це також дозволяє підтримати стабільність роботи ЛЕС. Згідно результатів дослідження [12] було встановлено, що використання енергороутера зі стратегією оптимального керування може знизити вартість енергії на 20–25 % порівняно з традиційним підходом до керування ЛЕС.

## **2. Оцінка стану ЛЕС з ДРГ**

Нарощування / зменшення рівнів генерації чи споживання електроенергії може бути стрибкоподібним або плавним (зміна відповідних функцій монотонно чи стрибкоподібно): за родом струму; за типом генерації – однотипна генерація чи гібридні системи.

Аналіз показав, що для виділеного класу ЛЕС важливо оцінити (проаналізувати) як техніко-економічні (цінові) фактори, так і технологічні фактори (оцінка стійкості, стабільності роботи ЛЕС при зміні режимів роботи генераторів та / чи навантажень), зокрема:

1) аналіз впливу сукупності різних факторів появи додаткових втрат електроенергії, обумовлених функціонуванням генераторів обмеженої потужності та змінних у часі навантажень;

2) співставлення втрат електроенергії для різних інтервалів часу через виділений (контрольований) перетин для випадків, коли напрямок потоку електроенергії є незмінним чи напрямок потоку електроенергії на конкретних інтервалах часу змінюється;

3) аналіз втрат електроенергії в системах постійного та змінного струму ЛЕС чи гібридних систем з оцінкою інтегральної нев'язки, яка визначає вплив сукупності спотворюючих факторів;

4) аналіз впливу зміни напруги  $\Delta U$  та струму  $\Delta I$  в перетині ЛЕС обмеженої потужності, коли зміна струму на навантаженні ( $\Delta I$ ) призводить до зміни вихідної напруги ( $\Delta U$ ) від генератора обмеженої потужності та визначається відповідною функціональною залежністю;

5) зміна споживання навантаженням активної потужності за першою гармонікою та за вищими гармоніками як інтегрованими показниками роботи ЛЕС з енергороутерами.



Пункти 1–3 визначають техніко-економічні фактори, а пункти 4 та 5 – технологічні фактори (оцінку стійкості, стабільності роботи) при оцінці ефективності режимів зазначених ЛЕС.

Важливою складовою ефективного функціонування енергорутерів в ЛЕС є аналіз складових втрат електроенергії, вплив на їх рівні різних факторів, а також формування відповідних критеріїв енергоефективності та парціального впливу елементів ЛЕС (рівнів електромагнітної сумісності) [13–15].

Загальною характеристикою ефективності передачі енергії, зокрема, втрат електроенергії в ЛЕС можна визначити реактивну потужність Фризе  $Q_F$  [20, 21]

$$Q_F = \sqrt{S^2 - P^2} . \quad (1)$$

Розглянемо систему, яка складається з однофазного генератора напруги  $u(t)$  та підключеного до нього навантаження зі струмом  $i(t)$ . Втрати при передачі енергії від генератора до навантаження на періоді  $T$  складаються з суми необхідних втрат  $W_N = R_S I_A^2 T = R_S P^2 T / U$ , які обумовлені протіканням струму  $i_A(t)$ , та додаткових втрат  $W_{AD} = R_S I_F^2 T = R_S Q_F^2 T / U$ , які обумовлені протіканням струму  $i_F(t)$  через вплив діючих факторів (причин) неякісності електроенергії [21].

Величина  $R_S$  моделює сумарний активний опір генератора та електричних ліній ЛЕС. Необхідним  $W_N$  та додатковим  $W_{AD}$  втратам поставимо у відповідність потужності втрат електроенергії – необхідних  $P_N = R_S P^2 / U$  та додаткових  $P_{AD} = R_S Q_F^2 / U$ .

У перетині ЛЕС генератор – навантаження для заданих величин  $P$  та  $U$  мінімальному значенню діючого струму генератора ЛЕС відповідає миттєвий струм  $i_A(t) = Pu(t)/U^2$ . Для квадрата діючого значення струму  $I^2$  в контрольованих перетинах справедливим є співвідношення

$$I^2 = \left( \int_0^T i^2(t) dt \right) / T = \left( \int_0^T [i_A(t) + i_R(t)]^2 dt \right) / T = I_A^2 + I_R^2, \quad (2)$$

де  $I_A$  та  $I_R$  – діючі значення активного  $i_A(t)$  та реактивного  $i_R(t)$  струмів. Оскільки має місце рівність  $I_A = P/U$ , то згідно з (2) одержимо

$$Q_F = U[I^2 - I_A^2]^{1/2} = UI_R. \quad (3)$$

Для розгляду особливостей формалізації процедур формування складових балансу електричної енергії наведемо способи розкладу миттєвих функцій  $i(t)$ ,  $u(t)$ ,  $p(t)$  на складові. Для цього здійснимо формальну процедуру розкладу функції  $i(t)$  в системі ортогональних функцій  $\{\varphi_i(t), i = 1, \dots, n_\varphi\}$  [21]. Оскільки при використанні функцій  $i(t)$ ,  $u(t)$  в перетині ЛЕС електромагнітні процеси розглядаються у двовимірній площині, то виберемо ортогональну систему у вигляді  $\{\varphi_i(t), i = 1, \dots, n_\varphi\}$  при  $n_\varphi = 2$ ;  $\varphi_1(t) \equiv u(t)$ ;  $\varphi_2(t) \equiv u_\perp(t)$ , де

$$\int_0^T u(t) u_\perp(t) dt = 0. \quad (4)$$

По відношенню до ортогональної системи  $\{u(t), u_\perp(t)\}$  струм  $i(t)$  розкладемо на дві ортогональні складові  $i_{||}(t)$  та  $i_\perp(t)$  ( $i(t) = i_{||}(t) + i_\perp(t)$ ), які за визначенням дорівнюють відповідно активній та реактивній складовим струму:

$$i_{||}(t) \equiv i_A(t); \quad i_\perp(t) \equiv i_R(t); \quad i(t) = i_A(t) + i_R(t). \quad (5)$$

Враховавши, що  $i_\perp(t) = i(t) - i_A(t)$ ;  $i_A(t) = u(t)/R_{||}$ , де  $R_{||} = U^2/P$ , то згідно з (4) та (5) запишемо

$$u_\perp(t) = R_\perp i_R(t) = R_\perp (i(t) - Pu(t)/U^2). \quad (6)$$

Щодо впливу сукупності різних факторів появи додаткових втрат електроенергії, обумовлених функціонуванням генератора та навантаження. Вираз (6) дозволяє формалізувати розгляд декомпозиції потужності Фризе  $Q_F$  на складові. Ці складові надалі дозволять здійснювати деталізацію складових додаткових втрат енергії в ЛЕС.

Причини виникнення додаткових втрат електроенергії в ЛЕС чи конкретному елементі системи можна систематизувати за напрямками [21]:

- спотворення якості електроенергії, що генерується генератором (обмежена та нерівномірною генерація ДРГ) – множина факторів появи додаткових втрат  $\{A\}$ ;
- вплив режимів роботи інших ЛЕС чи обладнання, наприклад, пристроїв силової електроніки (наявність електромагнітних завад, порушення електромагнітної сумісності) – множина факторів  $\{B\}$ ;
- зміни технологічних процесів (зміни режимів чи параметрів технологічних процесів, зокрема, зміни структури та параметри навантажень) – множина факторів  $\{C\}$ .

До факторів множини  $\{B\}$  відносяться енергетичні показники та характеристики електромагнітної сумісності елементів та систем, зміна режимів експлуатації (наприклад, температурних), зміна структури елементів системи чи структури самої системи. Фактори множини  $\{C\}$  відображають характеристики різних сторін протікання технологічних (енерготехнологічних) процесів, у тому числі й економічної



доцільності.

Оцінка наведених факторів може також розглядатися як основа для розробки пропозицій щодо зміни функцій навантаження (оптимізації їх роботи), чи зміни конфігурації підсистем ЛЕС, які працюють на постійному чи змінному струмі.

Нехай потужності множин  $\{A\}$ ,  $\{B\}$  та  $\{C\}$  визначаються величинами  $n_{F,A}$ ,  $n_{F,B}$  та  $n_{F,C}$ . Тоді на появу додаткових втрат електроенергії впливає  $n_{F,A} + n_{F,B} + n_{F,C}$  факторів із множини  $\{F\} = \{A\} \cap \{B\} \cap \{C\}$  [21]. Покладемо, що для кожного з  $n_F$  вибраної множини факторів появи додаткових втрат електроенергії  $\{F\}$  можна виділити функцію зміни  $\alpha_j [\Delta x_1^j, \dots, \Delta x_n^j]$ ,  $j = 1, \dots, n_F$ , спектра сигналу  $x_e(t)$  (під функцією  $x_e(t)$  розуміємо струм  $i(t)$  та напругу  $u(t)$ ),  $n'$  – кількість ортогональних складових сигналу  $x_e(t)$ , що враховуються при розгляді втрат;  $\Delta x_i^j$  – зміна  $i$ -ї ортогональної складової сигналу  $x_e(t)$  від впливу  $j$ -го фактора).

Як приклад декомпозиції потужності  $Q_F$  на складові наведемо процедуру декомпозиції потужності  $Q_F$  на складові для ЛЕС з однофазними стаціонарними навантаженнями. Покладемо, що генератор ЛЕС генератором необмеженої потужності. За характеристиками  $\alpha_j [\Delta x_1^j, \dots, \Delta x_n^j]$ ,  $j = 1, \dots, n_F$ , розділимо діючі значення струму таким чином:

$$I_R^2 = \sum_{j=1}^{n_F} I_{j,R}^2. \quad (7)$$

З урахуванням (7) квадрат потужності Фризе  $Q_F$  розіб'ємо на низку адитивних складових

$$Q_F^2 = \sum_{j=1}^{n_F} U^2 I_{j,R}^2 = \sum_{j=1}^{n_F} Q_{F,j}^2, \quad (8)$$

де  $Q_{F,j}$  – складова додаткових втрат від впливу  $j$ -го,  $j = 1, \dots, n_F$ , фактора.

Оскільки генератори ЛЕС представляють собою генератори обмеженої потужності, то для його діючого значення напруги  $U$  по аналогії із співвідношенням (7), при виділенні  $j$ -го фактора запишемо

$$U^2 = \sum_{j=1}^{n_F} U_j^2. \text{ Тоді у загальному випадку для } n_F \text{ вибраних факторів маємо}$$

$$Q_F^2 = \sum_{j_1, j_2=1}^{n_F} U_{j_1}^2 I_{j_2,R}^2 = \sum_{j_1, j_2=1}^{n_F} Q_{F,j_1, j_2}^2, \quad (9)$$

де  $Q_{F,j_1, j_2}$  – складова додаткових втрат, яка визначається впливом  $j_1$ -го фактору неякісності електроенергії на напругу  $u(t)$  та  $j_2$ -го фактору неякісності електроенергії на струм  $i(t)$ .

Поняття «характеристика неоптимальності» може використовуватися, коли одну з функцій ми будемо вважати як оптимальну (в даному випадку це функція споживання активної потужності). Використання  $Q_F$  для оцінки нерівномірності процесів покажемо на прикладі режиму, який характеризується діючими значеннями напруги  $U_i$  та струму  $I_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ ,  $T_i$  – тривалість  $i$ -го інтервалу, при умові  $\cos \varphi = 1$  для інтервалу  $T_T > T_{NET}$ , де  $T_{NET}$  – період мережі. У випадку  $\delta_i = T_i / T_T$ ,  $\sum \delta_i = 1$  можна записати вираз для потужності Фризе  $Q_F$  [25]:

$$Q_F = \sqrt{\sum_{i=1}^n U_i^2 \delta_i \cdot \sum_{i=1}^n I_i^2 \delta_i - (\sum_{i=1}^n U_i I_i \delta_i)^2}. \quad (10)$$

Співвідношення (10) дозволяє здійснювати у подальшому відповідні економічні розрахунки, зокрема, отримати відповідні техніко-економічні показники роботи ЛЕС.

Власне розраховані додаткові втрати електроенергії можна представити матрицею впливу, в якій елементом  $(j_1, j_2)$  буде складова втрат  $Q_{F,j_1, j_2}^2$ . Можемо знехтувати впливом окремих елементів ( $Q_{j_1, j_2}$ ) при умові  $(Q_{j_1, j_2}) < \delta_{Q_F}$ .

Важливого значення набуває співставлення втрат електроенергії для різних інтервалів сталості структури ЛЕС. Співставлення втрат електроенергії для різних інтервалів часу через виділений перетин згідно наведених співвідношень (1), (9), (10) для потужності Фризе доцільно здійснювати для двох випадків:

- 1) напрямок потоку електроенергії є незмінним;
- 2) напрямок потоку електроенергії змінюється.

Для опису особливостей такої оцінки розглянемо перетин А–А між двома елементами  $E_1$  та  $E_2$  системи. Покладемо, що на інтервалі часу  $T_{T1}$  має місце потік енергії від  $E_1$  до  $E_2$  із значеннями напруги  $u_1(t)$  та струму  $i_1(t)$ , а на інтервалі часу  $T_{T2}$  має місце потік енергії від  $E_2$  до  $E_1$  із значеннями напруги  $u_2(t)$  та струму  $i_2(t)$ . тоді можемо розрахувати два значення реактивної потужності Фризе  $Q_{F12}$  та  $Q_{F21}$ , які

визначаються функціями  $u_1(t)$ ,  $i_1(t)$  та  $u_2(t)$ ,  $i_2(t)$ .

Для співставлення втрат в контрольованому перетині А–А можемо застосувати показники:  $\Delta_{E1G} = Q^2_{F12} / (Q^2_{F12} + Q^2_{F21})$ ;  $\Delta_{E2G} = Q^2_{F21} / (Q^2_{F12} + Q^2_{F21})$ , де виконується умова  $\Delta_{E1G} + \Delta_{E2G} = 1$ . Також може бути доцільним застосувати показник  $\Delta_{12} = \Delta_{E1G} / \Delta_{E2G}$  чи  $\Delta_{21} = \Delta_{E2G} / \Delta_{E1G}$ .

Наведений підхід може бути поширений на довільне число визначених контрольованих перетинів та ЕНС, коли напрямки потоків енергії через виділені перетини є незмінними. При цьому зазначеннями величин  $\Delta_{E1G}$ ,  $\Delta_{E2G}$ ,  $\Delta_{12}$  чи  $\Delta_{21}$  можемо дати узагальнені характеристики зміни інтенсивності втрат електроенергії при зміні напрямків потоків енергії через виділені перетини ЛЕС.

### 3. Аналіз втрат електроенергії в системах постійного та змінного струму ЛЕС чи гібридних систем

В залежності від гармонічного складу можливі варіанти напруги та струму в перетинах ЛЕС представлено нижче:

- 1)  $u(t) = U_0$ ;  $i(t) = I_0$ ;
- 2)  $u(t) = u_1(t)$ ;  $i(t) = i_1(t)$ ;
- 3)  $u(t) = U_0$ ;  $i(t) = I_0 + i_\infty(t)$ ;
- 4)  $u(t) = U_0 + u_\infty(t)$ ;  $i(t) = I_0$ ;
- 5)  $u(t) = U_0 + u_\infty(t)$ ;  $i(t) = I_0 + i_\infty(t)$ ;
- 6)  $u(t) = u_1(t)$ ;  $i(t) = i_1(t) + i_\infty(t)$ ;
- 7)  $u(t) = u_1(t) + u_\infty(t)$ ;  $i(t) = i_1(t)$ ;
- 8)  $u(t) = u_1(t) + u_\infty(t)$ ;  $i(t) = i_1(t) + i_\infty(t)$ .

Для формування спрощених оцінок у подальшому розглянемо узагальнені варіанти 5 та 8 при використанні постійних складових та перших гармонік напруги і струму (5-й варіант) та перших і третіх гармонік напруги та струму (8-й варіант):

$$5\text{-й варіант: } u(t) = U_0 + u_1(t); i(t) = I_0 + i_1(t);$$

$$8\text{-й варіант: } u(t) = u_1(t) + u_3(t); i(t) = i_1(t) + i_3(t).$$

Для виділених узагальнених варіантів покажемо, що потужність Фризе  $Q_F$  дозволяє сформуванню однотипні показники ефективності енергетичних процесів як для систем змінного, так і постійного струму. Для системи постійного струму запишемо

$$\begin{aligned} Q_{F^2} &= S^2 - P^2 = (U_0^2 + U_1^2) \cdot (I_0^2 + I_1^2) - (P_0 + P_1)^2 = \\ &= (U_0^2 + U_1^2) \cdot (I_0^2 + I_1^2) - (U_0 \cdot I_0 + U_1 \cdot I_1)^2, \end{aligned} \quad (11)$$

де  $U_0$  та  $I_0$  – середні (діючі) значення постійної напруги та струму;  $U_1$  та  $I_1$  – діючі значення першої гармоніки напруги та струму у перетині ЛЕС.

Введемо модифіковану потужність  $Q_{F(0)}$  згідно наступного співвідношення:

$$Q_{F(0)}^2 = S^2 - P_0^2 = (U_0^2 + U_1^2) \cdot (I_0^2 + I_1^2) - P_0^2 = (U_0^2 + U_1^2) \cdot (I_0^2 + I_1^2) - (U_0 \cdot I_0)^2. \quad (12)$$

Для системи змінного струму запишемо

$$\begin{aligned} Q_{F^2} &= S^2 - P^2 = (U_1^2 + U_3^2) \cdot (I_1^2 + I_3^2) - (P_1 + P_3)^2 = \\ &= (U_1^2 + U_3^2) \cdot (I_1^2 + I_3^2) - (U_1 \cdot I_1 \cdot \cos\varphi_1 + U_3 \cdot I_3 \cdot \cos\varphi_3)^2, \end{aligned} \quad (13)$$

де  $U_1$  та  $I_1$  – діючі значення першої гармоніки напруги та струму;  $U_3$  та  $I_3$  – діючі значення третьої гармоніки напруги та струму;  $\varphi_1$  ( $\varphi_3$ ) – кут зсуву фаз між напругою та струмом першої (третьої) гармоніки у перетині ЛЕС.

Введемо модифіковану потужність  $Q_{F(1)}$  згідно наступного співвідношення:

$$Q_{F(1)}^2 = S^2 - P_1^2 = (U_1^2 + U_3^2) \cdot (I_1^2 + I_3^2) - P_1^2 = (U_1^2 + U_3^2) \cdot (I_1^2 + I_3^2) - (U_1 \cdot I_1 \cdot \cos\varphi_1)^2. \quad (14)$$

При  $\cos\varphi_1 = \cos\varphi_3 = 1$  вирази (13) та (14) набудуть вигляду:

$$Q_{F^2} = (U_1^2 + U_3^2) \cdot (I_1^2 + I_3^2) - (U_1 \cdot I_1 + U_3 \cdot I_3)^2; \quad (15)$$

$$Q_{F(1)}^2 = (U_1^2 + U_3^2) \cdot (I_1^2 + I_3^2) - (U_1 \cdot I_1)^2. \quad (16)$$

Відповідно можемо ввести коефіцієнти корисної дії  $\mu_{(0)}$  та  $\mu_{(1)}$ :

$$\mu_{(0)} = P_0 / (P_0 + P_1); \quad (17)$$

$$\mu_{(1)} = P_1 / (P_1 + P_2). \quad (18)$$

Також можемо визначити квадратичні різниці

$$Q_{\Delta F(0)}^2 = Q_{F(0)}^2 - Q_F^2 = (U_0 \cdot I_0 + U_1 \cdot I_1)^2 - (U_0 \cdot I_0)^2 = 2U_0 \cdot I_0 \cdot U_1 \cdot I_1 + (U_1 \cdot I_1)^2; \quad (19)$$

$$Q_{\Delta F(1)}^2 = Q_{F(1)}^2 - Q_F^2 = (U_1 \cdot I_1 \cdot \cos\varphi_1 + U_3 \cdot I_3 \cdot \cos\varphi_3)^2 - (U_1 \cdot I_1 \cdot \cos\varphi_1)^2. \quad (20)$$

Співвідношення (20) при  $\cos\varphi_1 = \cos\varphi_3 = 1$  можемо записати

$$Q_{\Delta F(1)}^2 = Q_{F(1)}^2 - Q_F^2 = (U_1 \cdot I_1 + U_3 \cdot I_3)^2 - (U_1 \cdot I_1)^2 = 2U_1 \cdot I_1 \cdot U_3 \cdot I_3 + (U_3 \cdot I_3)^2. \quad (21)$$

Вирази (19) та (21) після алгебраїчних перетворень та використанні наближених співвідношень  $(U_1 \cdot I_3)^2 \approx 0$  та  $(U_3 \cdot I_3)^2 \approx 0$  набудуть вигляду

$$Q_{\Delta F(0)}^2 = Q_{F(0)}^2 - Q_F^2 = (U_0 \cdot I_0 + U_1 \cdot I_1)^2 - (U_0 \cdot I_0)^2 = 2U_0 \cdot I_0 \cdot U_1 \cdot I_1 = 2P_0 \cdot P_1; \quad (22)$$

$$Q_{\Delta F(1)}^2 = Q_{F(1)}^2 - Q_F^2 = (U_1 \cdot I_1 + U_3 \cdot I_3)^2 - (U_1 \cdot I_1)^2 = 2U_1 \cdot I_1 \cdot U_3 \cdot I_3 = 2P_1 \cdot P_3. \quad (23)$$

При умові  $U_3 = 0$  та  $\cos\varphi_1 \neq 0$  вираз для визначення  $Q_F$  запишемо наступним чином

$$\begin{aligned} Q_F^2 &= S^2 - P^2 = U_1^2 \cdot (I_1^2 + I_3^2) - P_1^2 = U_1^2 \cdot I_1^2 \cdot \sin^2\varphi_1 + U_1^2 \cdot I_3^2 = \\ &= U_1^2 \cdot I_1^2 (\sin^2\varphi_1 + k_{\Pi}^2), \end{aligned} \quad (24)$$

де  $k_{\Pi} = I_3 / I_1$ . При  $S^2 \approx U_1^2 \cdot I_1^2$  має місце співвідношення  $Q_F^2 / S^2 = \sin^2\varphi_1 + k_{\Pi}^2$ .

#### 4. Вплив зміни напруги, струму та рівнів споживання активної потужності в перетині ЛЕС

При оцінці впливу зміни напруги  $\Delta U$  та струму  $\Delta I$  в перетині ЛЕС обмеженої потужності потрібно враховувати, що зміна струму на навантаженні ( $\Delta I$ ) призводить до зміни вихідної напруги ( $\Delta U$ ) від генератора обмеженої потужності (визначається відповідною функціональною залежністю). Для ЛЕС при оцінці рівнів неоптимальності їх роботи в більшості випадків потрібно враховувати внутрішній опір генератора  $R_{ВН}$  і опір лінії  $R_{Л}$ . Покладемо  $R_S = R_{INT} + R_L$ .

У загальному випадку для величин  $\Delta U$  та  $\Delta I$  має місце функціональна залежність  $\Delta U = f(\Delta I)$ , яку при врахуванні величин  $R_{INT}$  та  $R_L$ , можемо записати як  $\Delta U = \Delta I \cdot (R_{INT} + R_L) = \Delta I \cdot R_S$ . Розглянемо перетин ЛЕС при початкових значеннях напруги  $U_1$  та струму  $I_1$ . У разі зміни струму на величину  $\Delta I$  ( $I_2 = I_1 + \Delta I$ ), величина напруги  $U_2$  у виділеному перетині буде рівною  $U_2 = U_1 - \Delta I \cdot (R_{INT} + R_L) = U_1 - \Delta I \cdot R_S$ .

Величина реактивної потужності Фризе  $Q_F$  для даного випадку при розгляді двох інтервалів, ( $\delta_1 + \delta_2 = 1$ ) буде визначатися із співвідношення:

$$\begin{aligned} Q_F^2 &= (U_1^2 \delta_1 + U_2^2 \delta_2) (I_1^2 \delta_1 + I_2^2 \delta_2) - (U_1 I_1 \delta_1 + U_2 I_2 \delta_2)^2 = \\ &= (U_1^2 (1 - \delta_2) + (U_1 - \Delta I \cdot R_S)^2 \delta_2) (I_1^2 (1 - \delta_2) + (I_1 + \Delta I)^2 \delta_2) - \\ &- (U_1 I_1 (1 - \delta_2) + (U_1 - \Delta I \cdot R_S) (I_1 + \Delta I) \delta_2)^2. \end{aligned} \quad (25)$$

Після алгебраїчних перетворень співвідношення (25) може бути перетворено до вигляду:

$$Q_F^2 = \Delta I^2 \delta_2 \delta_1 \cdot (U_1 + R_S \cdot I_1)^2 - 2\Delta I^2 \delta_2 R_S U_1 \cdot (I_1 - \Delta I) - \Delta I^4 \delta_2 \cdot R_S. \quad (26)$$

Якщо третім доданком правій частині співвідношення (26) можна знехтувати, то значення  $Q_F^2$  визначається наближеною рівністю

$$Q_F^2 = \Delta I^2 \delta_2 \delta_1 \cdot (U_1 + R_S \cdot I_1)^2 - 2\Delta I^2 \delta_2 R_S U_1 \cdot (I_1 - \Delta I). \quad (27)$$

Точність застосування наближеного співвідношення (27) можна оцінити показником:

$$\beta_{Q_F} = (\Delta I^4 \delta_2 \cdot R_S) / [\Delta I^2 \delta_2 \delta_1 \cdot (U_1 + R_S \cdot I_1)^2 - 2\Delta I^2 \delta_2 R_S U_1 \cdot (I_1 - \Delta I) - \Delta I^4 \delta_2 \cdot R_S].$$

Співвідношення (25) та (26) показують складну залежність рівня неоптимальності споживання енергії в ЛЕС від зміни величин  $\Delta I$ ,  $\delta_2$ ,  $U_1$ ,  $R_S$  та  $I_1$ . Для ілюстрації оцінки впливу зазначених величин на величину  $Q_F^2$  на рис. 3 представлено залежності  $Q_F^2(\delta_2)$  від параметрів  $I_1$ ,  $R_S$  та  $\Delta I$  при  $U_1 = 200$  В;  $I_1 = 0,2$  А;  $R_S = 0,2$  Ом та при  $\Delta I = 0,2$  А (крива С1);  $\Delta I = 0,5$  А (крива С2) та  $\Delta I = 1,0$  А (крива С3).

Для оцінки зміни споживання навантаженням активної потужності  $\Delta P_{(1)}$  за першою гармонікою та  $\Delta P_{(\infty)}$  за вищими гармоніками як інтегрованими показниками розглянемо уточнення рівнів неоптимальності споживання активної потужності в ЛЕС на вищих гармоніках (наявність однойменних гармонік напруги і струму) з використанням потужності Фризе  $Q_F$ . Покладемо, що активна потужність  $P$  є сумою двох складових  $P = P_1 + \Delta P$ , де відповідно  $P_1$  і  $\Delta P$  – споживання активної потужності по першій і вищих гармоніках. У цьому випадку можемо записати:

$$Q_F^2 = S^2 - P^2 = S^2 - (P_1 + \Delta P)^2. \quad (28)$$

Якщо врахувати, що  $S^2 = U^2 I^2 = U_1^2(1 + \delta_u^2)I_1^2(1 + \delta_i^2)$ ,  $S_1^2 = U_1^2 I_1^2$  то співвідношення (28) можемо представити у вигляді:

$$Q_F^2 = S^2 - P^2 = U_1^2 I_1^2 (1 + \delta_u^2) (1 + \delta_i^2) - (P_1 + \Delta P)^2, \quad (29)$$

де  $\delta_u$  та  $\delta_i$  – коефіцієнти вищих гармонік по напрузі і струму.

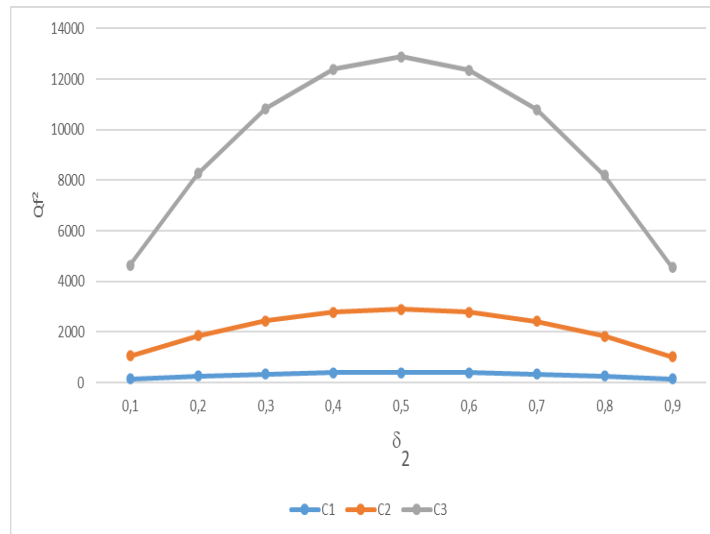


Рисунок 3 – Графіки залежностей  $Q_F^2(\delta_2)$  від параметрів  $I_1$ ,  $R_s$  та  $\Delta I$

З врахуванням співвідношення  $Q_1^2 = S_1^2 - P_1^2$  та умов  $\delta_u^2 \ll \delta_i^2$  і  $\Delta P^2 \ll P_1^2$ , співвідношення (26) може бути перетворено до вигляду:

$$Q_F^2 = Q_1^2 + U_1^2 I_1^2 (\delta_u^2 + \delta_i^2) - (P_1^2 + 2P_1 \Delta P)^2.$$

Для оцінки неоптимальності процесів в ЛЕС з урахуванням негативного впливу активної потужності на вищих гармоніках доцільно застосовувати модифікацію потужності Фризе в запису  $Q_{F(1)}^2 = S^2 - P_1^2$ , яка для формули (29) представляється у формі

$$Q_{F(1)}^2 = S^2 - P_1^2 = U_1^2 I_1^2 (1 + \delta_u^2) (1 + \delta_i^2) - P_1^2. \quad (30)$$

Співставлення співвідношень (29) та (30) дозволяє визначити «внесок» наявності споживання активної потужності  $\Delta P$  в системі:

$$Q_{F(\Delta P)}^2 = Q_{F(1)}^2 - Q_F^2 = 2P_1 \Delta P + \Delta P^2. \quad (31)$$

Для оцінки впливу  $\Delta P$  на рівень неоптимальності передачі потужності  $P_1$  з використанням (31) можна використати співвідношення:

$$Q_{F(\Delta P)}^2 / P_1^2 = 2(\Delta P / P_1) + (\Delta P / P_1)^2. \quad (32)$$

У випадку  $2P_1 \Delta P \gg \Delta P^2$ , має місце наближене співвідношення  $Q_{F(\Delta P)}^2 \approx 2P_1 \Delta P$ , яке відображає лінійну залежність величини  $Q_{F(\Delta P)}^2$  від величин складової потужності  $P_1$  та  $\Delta P$ . У таблиці наведена оцінка впливу  $\Delta P$  на рівень неоптимальності передачі потужності  $P_1 = 2$  кВт. Зазначимо, що при апроксимації  $\Delta P = \alpha_P P_1$  співвідношення (32) набуде вигляду  $Q_{F(\Delta P)}^2 / P_1^2 = 2\alpha_P + (\alpha_P)^2$ .

Таблиця – Оцінка впливу  $\Delta P$  на рівень неоптимальності передачі потужності  $P_1$

Величина	$\Delta P$ , кВт							
	0,1	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5
$Q_{F(\Delta P)}^2$ , (кВАр) <sup>2</sup>	0,41	0,84	1,063	1,29	1,523	1,76	2,003	2,25
$Q_{F(\Delta P)}^2 / P_1^2$	0,103	0,21	0,266	0,323	0,381	0,44	0,501	0,563

### Висновки

1. Використання енергетичних роутерів є перспективним напрямком розвитку сучасних енергетичних систем. Їх важливість передбачає забезпечення ефективного керування енергетичними потоками, точного обліку електроенергії та розуміння динаміки процесів. Впровадження цих технологій може сприяти побудові стійких, ефективних та сталих енергетичних систем, які відповідають вимогам сучасного світу. Енергетичні роутери забезпечують ефективну маршрутизацію енергії в мережі,

контролюють напругу і потужність в системі та забезпечують сумісність між різними енергосистемами. При підключенні до інтелектуальної мережі енергетичні роутери регулюють потоки електроенергії з ЛЕС в інтелектуальну мережу і навпаки, беручи до уваги попит і пропозицію електроенергії в межах ЛЕС.

2. Важливою складовою ефективного функціонування енергороутерів та платформеного підходу в ЛЕС, відповідно до вимог Енергетичного Інтернету, є аналіз складових втрат електроенергії, вплив на їх рівні різних факторів, а також формування відповідних критеріїв енергоефективності та парціального впливу елементів ЛЕС (показників оцінки рівнів електромагнітної сумісності).

3. Використання потужності Фризе  $Q_F$  дозволило з єдиних позицій врахувати процеси енергозабезпечення навантажень ЛЕС на змінному та постійному струмі, надає можливість ретроспективного, поточного та перспективного аналізу – однотипно для постійного та змінного струмів; загальна оцінка по однотипні (спільній) методології. Декомпозиція миттєвої функції сигналу використовується для аналізу часткового впливу складових сигналу (напруги та/або струму) через різні додаткові джерела втрат потужності на ділянці ЛЕС. З використанням декомпозиції миттєвих функцій сигналів виконано аналіз парціального впливу складових сигналів (напруги та / чи струму), обумовленими різними факторами появи додаткових втрат електроенергії, в перетині ЛЕС.

4. Оцінено як техніко-економічні (цінові) фактори, так і технологічні фактори (оцінка стійкості, стабільності роботи ЛЕС при зміні режимів роботи генераторів та / чи навантажень), зокрема: вплив сукупності різних факторів появи додаткових втрат електроенергії, обумовлених функціонуванням генератора та навантаження; співставлення втрат електроенергії для різних інтервалів часу через виділений перетин: напрямок потоку електроенергії є незмінним чи напрямком потоку електроенергії змінюється; аналіз втрат електроенергії в системах постійного та змінного струму ЛЕС чи гібридних систем (введення модифікованих потужностей  $Q_{F(0)}$  та  $Q_{F(1)}$ , як інтегральної оцінки нев'язки, яка визначає вплив спотворюючих факторів); вплив зміни напруги  $\Delta U$  та струму  $\Delta I$  в перетині ЛЕС обмеженої потужності; зміна споживання навантаженням активної потужності  $\Delta P_{(1)}$  за першою гармонікою та  $\Delta P_{(\infty)}$  за вищими гармоніками як інтегрованими показниками.

#### Список використаної літератури

1. Global Energy Transformation: A Roadmap to 2050. IRENA. 2019. 52 p.
2. Maria Luisa Di Silvestre, Salvatore Favuzza, Eleonora Riva Sanseverino, Gaetano Zizzo. How Decarbonization, Digitalization and Decentralization are changing key power infrastructures. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Volume 93. P. 483–498. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.068>
3. Денисюк С.П. Енергетичний перехід–вимоги якісних змін у розвитку енергетики. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2019. № 1. С. 7–28.
4. The Energy Internet. An Open Energy Platform to Transform Legacy Power Systems into Open Innovation and Global Economic Engines. Edited by Wencong Su, Alex Q. Huang, Elsevier Ltd, 2019. 380 p.
5. Kloppenburg, S., Boekelo, M. Digital platforms and the future of energy provisioning: Promises and perils for the next phase of the energy transition. *Energy Research & Social Science*. 2019. Vol. 49. P. 68–73.
6. Кириленко О.В., Жуйков В.Я., Денисюк С.П. Використання динамічної тарифікації для оптимізації техніко-економічних показників ЛЕС на локальних ринках електроенергії. *Техн. електродинаміка*. 2022. № 3. С. 37–48. doi:10.15407/techned2022.03.037
7. <https://social-innovation.hitachi/en-eu/about/white-papers/digital-energy/the-future-of-energy/>
8. Bin Liu, Bingzhao Zhu, Ziyong Guan, Chengxiong Mao, Dan Wang. Energy router interconnection system: A solution for new distribution network architecture toward future carbon neutrality. – <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1049/enc2.12062>. doi.org/10.1049/enc2.12062
9. Xianyang Cui, Yulong Liu, Ding Yuan, Tao Jin, Mohamed A. Mohamed. A Hierarchical Coordinated Control Strategy for Power Quality Improvement in Energy Router Integrated Active Distribution Networks. *Sustainability*. 2023, 15(3), 2655. doi.org/10.3390/su15032655
10. Zhang, J., Xu, Y., Wang, W., Juneja, A., Bhattacharya, S. Energy Router: Architectures and Functionalities toward Energy Internet. *IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*. Oct. 2011. doi: 10.1109/SmartGridComm.2011.6102340
11. Chen, R., Yang, Y., Jin, T. Protection and Control of Modern Power Systems. *Article number 15: A hierarchical coordinated control strategy based on multi-port energy router of urban rail transit*, 2022.
12. Zhang, J., Xu, Y., Wang, W., Juneja, A., Bhattacharya, S. *Energy Router: Architectures and Functionalities toward Energy Internet*. Oct. 2011.
13. Wang, K., Yu, J., Yu, Y., Qian, Y. A survey on energy internet: architecture, approach, and emerging technologies. *IEEE Systems Journal*. 2018. Vol. 12. № 3. P. 2403–2416.
14. Zeng, P., Li, H., He, H., Li, S. Dynamic energy management of a ЛЕС using approximate dynamic programming and deep recurrent neural network learning. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2019. Vol. 10, iss. 4. P. 4435–4445.
15. Zhu, J. Optimization of Power System Operation. N-Y.: John Wiley & Sons, 2015. – 638 p.

16. Denysiuk, S., Zaichenko, S., Opryshko, V., Derevianko, D. Assessment of consumers power consumption optimization based on demand side management. *EUREKA, Physics and Engineering*. 2021(2). P. 19–31. doi:10.21303/2461-4262.2021.001689
19. Жаркин А.Ф., Денисюк С.П., Попов В.А. Системы электроснабжения с источниками распределенной генерации. *Київ: Наукова думка*, 2017. 230 с.
20. Денисюк С.П. Аналіз та оптимізація енергопроцесів у розосереджених електроенергетичних системах. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 4. С. 62–64.
21. Жуйков В.Я., Денисюк С.П. *Енергетичні процеси в електричних колах з ключовими елементами*. Київ: Текст, 2010. 264 с.
22. Lei, B., Xu, L., Wang, Z., Wang, Y., Huang, Q. *Journal of Physics: Conference Series, Design of Multi-port Direct Current Energy Router*. Conf. Ser. 2030 012027, 2021.
23. Liu, B., Zhu, B., Guan, Z., Mao, C., Wang, D. Energy router interconnection system: A solution for new distribution network architecture toward future carbon neutrality. *Energy Convers. Econ.* 3. 2022. P. 181–200.
24. Xie, Z., Manimaran, G., Vittal, V., Phadke, A. G., Centeno, V. An Information Architecture for Future Power Systems and Its Reliability Analysis. *IEEE Transactions on Power Systems*/ 2002/ vol. 17, No. 3. P. 857–863.
25. Денисюк С.П., Опришко В.П. Оцінка нерівномірності споживання та генерації електричної енергії в локальних електроенергетичних системах. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2017. №48. С. 43–51.

S. Denysiuk<sup>1</sup>, Dr. Sc. (Eng.), Prof., ORCID 0000-0002-6299-3680

K. Hilevich<sup>1</sup>, Ph. D. student, ORCID 0000-0001-9074-0683

<sup>1</sup>National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

## OPTIMIZATION OF THE USE OF DISTRIBUTED ENERGY RESOURCES IN LOCAL ELECTRICAL POWER SYSTEMS ACCORDING TO THE CRITERION OF MINIMUM LOSS OF ELECTRICITY

**Abstract.** *The issue of optimizing the use of distributed energy resources in local electric power systems (LES) based on the criterion of minimum power loss is considered. It was determined that an important step in optimizing the use of distributed energy resources in the LES is the development of an energy router that allows devices that generate, store, and consume electricity to be combined into a single system at low voltage (without integration into medium voltage electrical networks). The energy router itself can be positioned as a basic device that ensures the operation of LES, the interaction of neighboring LES at the level of energy and information exchange, and the integration of specific LES to medium voltage distribution networks.*

*It is shown that the basic component of the evaluation of the effective functioning of energy routers and the platform approach in the LES, in accordance with the requirements of the Energy Internet, is the analysis of the components of electricity losses, the influence on their level of various factors, as well as the formation of appropriate energy efficiency criteria and the assessment of the partial impact of LES elements. It is proposed to carry out a description of energy processes during the decomposition of Frize reactive power with the allocation of reactive and active current in the controlled intersections of the system. The decomposition of the QF power into components under the action of various causes (factors) of additional electricity losses in the LES, in particular, due to different modes of operation of generators and LES loads (voltage and current spectra), both during the period of system operation and for an arbitrary period of time, was considered. which is determined by technological factors of system operation.*

*The use of Frize power made it possible to take into account the energy supply processes of LES loads on alternating and direct current from a single point of view, in particular, to assess the impact of a combination of various factors of the appearance of additional electricity losses; comparison of electricity losses for different time intervals through a selected controlled intersection, when the direction of the flow of electricity is constant or the direction of the flow of electricity changes during separate time intervals; analysis of electricity losses in direct and alternating current systems of LES or hybrid systems, where modified capacities are introduced, as integral estimates of the discrepancy, which determines the influence of distorting factors; assessment of the impact of changes in voltage and current in the intersection of LES of limited power on the components of additional losses; analysis of changes in load consumption of active power according to the first harmonic and higher harmonics as integral indicators.*

**Keywords:** *local electric power systems, distributed energy resources, Energy Internet, energy router, energy processes, Friese power, factors of distortion of energy consumption, components of electricity losses, optimization procedures.*

References

1. Global Energy Transformation: A Roadmap to 2050. IRENA. 2019. 52 p.
2. Maria Luisa Di Silvestre, Salvatore Favuzza, Eleonora Riva Sanseverino, Gaetano Zizzo. How Decarbonization, Digitalization and Decentralization are changing key power infrastructures. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Volume 93. P. 483–498. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.068>
3. Denysiuk, S. Energy transition – requirements for qualitative changes in energy development. *Energy: economy, technologies, ecology*. 2019. No. 1. P. 7–28.
4. The Energy Internet. An Open Energy Platform to Transform Legacy Power Systems into Open Innovation and Global Economic Engines. Edited by Wencong Su, Alex Q. Huang, Elsevier Ltd, 2019. 380 p.
5. Kloppenburg, S., Boekelo, M. Digital platforms and the future of energy provisioning: Promises and perils for the next phase of the energy transition. *Energy Research & Social Science*. 2019. Vol. 49. P. 68–73.
6. Kyrlyenko, O., Zhuykov, V., Denysiuk, S. The use of dynamic pricing to optimize technical and economic indicators of LES on local electricity markets. *Technical electrodynamics*. 2022. No. 3. P. 37–48. doi:10.15407/techned2022.03.037
7. <https://social-innovation.hitachi/en-eu/about/white-papers/digital-energy/the-future-of-energy/>
8. Bin Liu, Bingzhao Zhu, Ziyou Guan, Chengxiong Mao, Dan Wang. Energy router interconnection system: A solution for new distribution network architecture toward future carbon neutrality. – <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1049/enc2.12062>. doi.org/10.1049/enc2.12062
9. Xianyang Cui, Yulong Liu, Ding Yuan, Tao Jin, Mohamed A. Mohamed. A Hierarchical Coordinated Control Strategy for Power Quality Improvement in Energy Router Integrated Active Distribution Networks. *Sustainability*. 2023, 15(3), 2655. [doi.org/10.3390/su15032655](https://doi.org/10.3390/su15032655)
10. Zhang, J., Xu, Y., Wang, W., Juneja, A., Bhattacharya, S. Energy Router: Architectures and Functionalities toward Energy Internet. *IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*. Oct. 2011. doi: 10.1109/SmartGridComm.2011.6102340
11. Chen, R., Yang, Y., Jin, T. Protection and Control of Modern Power Systems. *Article number 15: A hierarchical coordinated control strategy based on multi-port energy router of urban rail transit*, 2022.
12. Zhang, J., Xu, Y., Wang, W., Juneja, A., Bhattacharya, S. *Energy Router: Architectures and Functionalities toward Energy Internet*. Oct. 2011.
13. Wang, K., Yu, J., Yu, Y., Qian, Y. A survey on energy internet: architecture, approach, and emerging technologies. *IEEE Systems Journal*. 2018. Vol. 12. № 3. P. 2403–2416.
14. Zeng, P., Li, H., He, H., Li, S. Dynamic energy management of a JIEC using approximate dynamic programming and deep recurrent neural network learning. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2019. Vol. 10, iss. 4. P. 4435–4445.
15. Zhu, J. Optimization of Power System Operation. N-Y.: John Wiley & Sons, 2015. – 638 p.
16. Denysiuk, S., Zaichenko, S., Opryshko, V., Derevianko, D. Assessment of consumers power consumption optimization based on demand side management. *EUREKA, Physics and Engineering*. 2021(2). P. 19–31. doi:10.21303/2461-4262.2021.001689
17. Zharkin, A., Denysiuk, S., Popov, V. Power supply systems with distributed generation sources. *Kyiv: Naukova Dumka*. 2017. 230 p.
18. Denysiuk, S. Analysis and optimisation of energy processes in distributed electric power systems. *Technical electrodynamics*. 2016. № 4. P. 62–64.
19. Zhuykov, V., Denysiuk, S. Energy processes in electrical circuits with key elements. *Kyiv: Text*, 2010. 264 p.
20. Lei, B., Xu, L., Wang, Z., Wang, Y., Huang, Q. *Journal of Physics: Conference Series, Design of Multi-port Direct Current Energy Router*. Conf. Ser. 2030 012027, 2021.
21. Liu, B., Zhu, B., Guan, Z., Mao, C., Wang, D. Energy router interconnection system: A solution for new distribution network architecture toward future carbon neutrality. *Energy Convers. Econ.* 3. 2022. P. 181–200.
22. Xie, Z., Manimaran, G., Vittal, V., Phadke, A. G., Centeno, V. An Information Architecture for Future Power Systems and Its Reliability Analysis. *IEEE Transactions on Power Systems/ 2002/* vol. 17, No. 3. P. 857–863.
23. Denysiuk, S., Opryshko, V. Estimation of non-uniformity of consumption and generation of electric energy in local electric power systems. *Proceedings Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine*. 2017. No. 48. P. 43–51.

Надійшла: 02.11.2023

Received: 02.11.2023