

# SMART GRID СИСТЕМИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ

## SMART GRID SYSTEMS AND TECHNOLOGIES

УДК 621.316

DOI 10.20535/1813-5420.3.2023.289648

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

В.В. Лисий<sup>1</sup>, аспірант, ORCID 0000-0003-3714-7623

<sup>1</sup>Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

### АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ ЕНЕРГООБМІНУ ПРИ БАЛАНСУВАННІ РЕЖИМІВ СИСТЕМ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ З РОЗОСЕРЕДЖЕНОЮ ГЕНЕРАЦІЄЮ

*Показано, що важливою умовою стабільної роботи сучасних системах енергозабезпечення є дотримання балансу між виробництвом та споживанням електричної енергії. Активне збільшення частки відновлюваних джерел енергії змушує застосовувати нові алгоритми балансування попиту та пропозицій, зокрема, за рахунок гнучкості. Це передбачає необхідність впроваджувати нові технологічні рішення та підходи до балансування режимів генерації та споживання (здатність оперативно реагувати на зміни попиту та пропозиції), що, у свою чергу, вимагає детального аналізу процесів обміну енергії в електроенергетичних системах.*

*Визнано за необхідність поглибленого аналізу балансу складових енергій, оцінки електромагнітної сумісності в електроенергетичних системах, особливо в умовах зростаючого впливу відновлюваних джерел енергії на локальні ринки електроенергії. Аналіз різноманітних факторів впливу технологічних рішень та співпраці різних сторін ринку є ключовими складовими для розробки ефективних стратегій керування та забезпечення стійкості електроенергетичної системи.*

*Розглянуто особливості аналізу процесів енергообміну в локальних електроенергетичних системах з визначенням обмінних потужностей, які є інтегральними характеристиками впливу різних факторів неякісності електроенергії на обмінні процеси. Запропоновано здійснювати підведення балансу складових електричної енергії на основі обмінних процесів у контрольованих перетинах локальних електроенергетичних системах з використанням складових миттєвої потужності на кожному енергетично незмінному стані. Проаналізовано обмінні процеси в локальних електроенергетичних системах з виділенням різних режимів їх роботи, зокрема, при оцінці рівня електромагнітної сумісності елементів локальних електроенергетичних систем.*

*Введення обмінних потужностей дозволило розробити показники оцінки рівня електромагнітної сумісності елементів локальної системи. Для оцінки дольового внеску споживачів на погіршення якості електроенергії в точці загального підключення запропоновано алгоритм оцінки взаємного впливу елементів з виділенням внеску елемента у спотворення електроенергії у контрольованому перетині та аналізу величини впливу спотворюючих факторів на електромагнітні процеси в елементі системи.*

*Сформовано оптимізаційну модель досягнення заданих рівнів балансування (гнучкості) в локальних електроенергетичних системах з акумуляторами енергії.*

**Ключові слова:** системи енергозабезпечення, локальні електроенергетичні системи, відновлювані джерела енергії, розосереджена генерація, балансування режимів, гнучкість, керування попитом, обмінна потужність.

#### Вступ

На сьогодні розвиток електроенергетики передбачає суттєві трансформаційні зміни [1 – 4]. Важливою умовою стабільної роботи сучасних ринків електричної енергії є дотримання балансу між виробництвом та споживанням електричної енергії [4 – 7]. На ринках, які засновані на монополії та відсутності конкуренції, питання дотримання балансу між попитом та пропозицією вирішувалось наступним чином: виробники електричної енергії підтримували великі резерви генеруючих потужностей, які були дуже неефективні та дорогі, а витрати на ці додаткові резерви оплачувались за рахунок споживачів чи податків. При цьому проблеми з балансом попиту та пропозиції вирішувались шляхом обмеження генерації.

З впровадженням конкурентних ринків електричної енергії при широкому застосуванні відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) підходи до виробництва та споживання електроенергії

змінились [8 – 10]. У першу чергу учасники ринку та оператор системи передачі (розподілу) вже мають нести спільну відповідальність за баланс виробництва та споживання електричної енергії. Саме тому учасники ринку планують свою діяльність таким чином, щоб балансувати виробництво та попит з найменшими відхиленнями як частоти, так і від визначених профілів генерації та споживання електроенергії [5 – 8].

Слід зазначити, що витрати на диспетчеризацію і резервування зростають пропорційно встановленій потужності електростанції, які виробляють електроенергію з ВДЕ, зокрема, сонячних (СЕС) та вітрових (ВЕС) електростанцій, та на сьогоднішній день у переважній більшості випадків не компенсуються власниками цих електростанцій [11 – 14]. Можливість інтеграції до складу ОЕС України потужностей ВЕС та СЕС в основному обумовлюється можливостями забезпечення виконання вимог адекватності генерації – можливість підтримки постійного балансу між генерацією і споживанням електричної енергії при нормативній її якості при забезпеченні необхідного рівня резервних потужностей. Встановлено, що використання повною мірою вже існуючих ВДЕ та будівництво нових джерел генерації неможливі без засобів балансування енергосистеми [8, 10]. Так, частка генерації ВЕС та СЕС в покритті навантаження електроенергії видна з балансу електроенергії в Україні за 2021 р.: АЕС – 56,0 %; ТЕС – 25,0; ТЕЦ – 4,0; ГЕС – 3,0; ГАЕС – 1,0; СЕС – 6,0; ВЕС – 5,0 %.

Несталість режимів роботи ВДЕ негативно впливає на балансову надійність енергосистеми, а також на стійкість її роботи [6, 7, 11]. Активне збільшення частки ВДЕ, як розосередженої генерації, в енергосистемі, змушує систему приймати нові правила роботи при балансуванні попиту та пропозиції, у першу чергу, за рахунок підвищення гнучкості системи, тобто здатності забезпечувати баланс попиту та пропозиції, підтримувати безперервність у неочікуваних ситуаціях і справлятися з невизначеністю попиту та пропозиції [3, 11].

Історично традиційні електроенергетичні системи були спроектовані з великими централізованими генеруючими станціями, де виробництво відповідало попиту на електроенергію; таким чином баланс був досяжним до певного рівня [5 – 7, 12]. Однак інтеграція генераторів відновлюваної енергії як частини інтелектуальних мереж ускладнила процес через їх невизначеність і переривчастість. Дисбаланс електроенергії, спричинений зростанням попиту та піковим навантаженням, призводить до зростання навантаження на електричну інфраструктуру та постійного зростання цін на енергію та значно впливає на надійність і якість електроенергії [12 – 14]. Пікове навантаження зазвичай обумовлено характеристиками споживання електроенергії кінцевими користувачами. Незважаючи на те, що тривалість пікового навантаження може бути відносно короткою, резервні потужності електростанцій все одно повинні бути в режимі очікування, щоб забезпечити задоволення попиту на електроенергію в будь-який час. Щоб підтримувати економічно ефективний баланс попиту та пропозиції електроенергії, доцільно застосовувати два механізми [14, 16]. Перший механізм заснований на інтеграції систем накопичення енергії, а другий механізм зосереджений на мінімізації пікового навантаження шляхом заохочення кінцевих користувачів змінити свою поведінку у споживанні електроенергії за допомогою стимулюючих переваг. Перший механізм в основному обмежений високими початковими та експлуатаційними витратами. Другий механізм суттєво залежить від можливостей і бажання кінцевих користувачів та передбачає широке застосування механізмів керування попитом (Demand Side Management, DSM) при стратегічному плануванні. При цьому програми DSM повинні бути ретельно розроблені, щоб стимулювати можливості кінцевих користувачів на стороні попиту на електроенергію [16, 17].

Балансування має вирішальне значення для надійної та безперервної роботи електроенергетичної системи та може бути досягнуте за допомогою керування генерацією, керування попитом, правильного планування та ведення режимів [14 – 17]. Нові балансуючі потужності мають використовуватися для швидкого відновлення співвідношення попиту та пропозиції в електроенергетичних енергосистемах, зокрема і в локальних системах.

Проблему з балансуванням можна вирішити шляхом збільшення кількості об'єктів гнучкої генерації або потужностей акумуляції енергії, збільшення пропускної здатності, а також покращення здатності керування попитом [18 – 20]. Концепція гнучкості передбачає здатність енергосистеми підтримувати баланс між виробництвом і навантаженням в умовах невизначеності. Існує ще й адміністративний захід забезпечення гнучкості. Він полягає у тимчасовому обмеженні відпуску електроенергії з ВДЕ, у періоди коли існує загроза безпечної роботі системи або коли локальні лінії електропередачі не здатні пропустити додаткові обсяги електроенергії. Такий підхід називається «обмеженням відпуску».

Відповідно до матеріалів Міжнародного енергетичного агентства гнучкість енергосистеми означає «ступінь, до якої енергосистема може змінити виробництво або споживання електроенергії у відповідь на мінливість, очікувану чи іншу», або як «модифікація моделі генерації та/або споживання у відповідь на зовнішній сигнал (ціновий сигнал або активація) з наданням послуг в енергетичній системі». Отже, гнучкість енергосистеми – це здатність змінювати рівень виробництва (або споживання) електроенергії у відповідь на інструкції або сигнали, такі як, наприклад, коливання потужності ВДЕ [19]. Гнучкість

характеризується двома параметрами:

- 1) час відгуку – за скільки секунд, хвилин або годин;
- 2) тривалість – протягом якого часу динамічні характеристики лишаються стійкими (хвилини, години або дні).

Не викликає сумнівів, що для інтеграції ВДЕ в ОЕС України потрібна гнучкість. Можливі джерела гнучкості: ГЕС/ГАЕС, інтерконектори, накопичувачі, маневрені ТЕС, зокрема, за напрямками:

- генерація: ГЕС, теплова потужність;
- електромережа: перетоки між країнами, концепція Smart Grid;
- регулювання попиту: гнучкість попиту, споживачі регулюють своє навантаження;
- накопичення: технології накопичення (ГАЕС, батареї тощо).

Аналіз показав, що при впровадженні заходів балансування та гнучкості в Україні можна виділити три рівня [8 – 10, 18 – 22]:

- ОЕС України – загальнодержавна енергетична система;
- електроенергетична система на рівні систем передачі – регіональні електроенергетичні системи;
- системи енергозабезпечення на рівні розподілу електроенергії, у тому числі автономні – локальні електроенергетичні системи з ВДЕ (ЛЕС).

На сьогодні вже постало незаперечним твердження, що енергосистеми майбутнього будуть включати ВДЕ як базову енергію плюс гнучка генерація для балансування системи, а аналіз проблем балансування попиту та пропозицій, гнучкості в ЛЕС доцільно здійснювати на основі аналізу обмінних енергетичних процесів.

**Метою роботи** є вивчення різних аспектів енергообміну, включаючи генерацію, передачу, розподіл та споживання електроенергії. Дослідження спрямоване на визначення фізичних та технічних особливостей цих процесів, а також на аналіз впливу факторів, таких як навантаження, втрати енергії та ефективність системи.

#### **Гнучкість як базовий елемент балансування попиту та пропозицій**

Гнучкість електроенергетичних систем зменшує ймовірність знеструмлення, коли попит на електроенергію високий [20 – 22]. Гнучкість мережі є складною динамічною системою, і майже неможливо врахувати всі локальні фактори в глобальному масштабі. Однак підвищена гнучкість мережі має вирішальне значення, якщо ми хочемо отримувати більше 25 % електроенергії зі змінних ВДЕ [21, 22]. Щоб постачання електроенергії стало переважно або повністю відновлюваним, мережа має стати більш гнучкою та адаптованою, ніж сьогодні. Гнучка мережа зможе впоратися з нестабільністю попиту та пропозиції електроенергії та досягти сталого балансу.

Покращення гнучкості електроенергетичних систем доцільно вести за такими напрямками [22].

**Постачання.** Ми можемо вирівняти піки та спади пропозиції, розширивши використання постійних відновлюваних джерел, таких як геотермальна або атомна енергія. Smart інвертори від сонячних джерел можуть сприяти стабільності мережі через двосторонній зв'язок і виконувати допоміжні функції, пов'язані з регулюванням напруги та частоти. Технологія Vehicle-to-Grid також може допомогти, дозволяючи заряджати електромобілі, щоб за потреби подавати електроенергію в мережу або сповільнювати швидкість заряджання під час пікового попиту.

**Зберігання.** Кращі батареї, насосна гідросистема, розплавлена сіль – є багато способів, за допомогою яких намагаються покращити механізми накопичення електроенергії в масштабах, які мають допомогти впоратися з падінням пропозиції або піками попиту.

**Спосіб передавання.** Доцільно об'єднати генеруючі зобов'язання, щоб групи ВЕС або СЕС працювали разом, а не мали індивідуальні стосунки з енергосистемою.

**Попит.** Інтелектуальні технології можуть допомогти підприємствам і будівлям ефективніше взаємодіяти з електричною мережею та зменшити різкі зміни попиту. Наприклад, із застосуванням Clade Cloud – інтелектуальної системи для підключення теплових насосів до ринків електроенергії та механізми, які дозволяють ефективно використовувати засоби керування опаленням і охолодженням, накопичувачі тепла та власні генератори енергії (у активних споживачів) [22].

Зі зростанням частки електроенергії з ВДЕ збільшуються і коливання обсягів генерації електроенергії з ВДЕ [18, 22]. Цей виклик стоїть перед операторами електроенергетики в усьому світі, серед яких і оператори НЕК «Укренерго». Балансувати такі коливання можливо шляхом додавання маневрених або акумуляуючих потужностей, а також через заходи керування попитом та збільшення пропускної здатності мереж передачі. Проблема з балансуванням можна вирішити шляхом збільшення кількості об'єктів гнучкої генерації або потужностей акумуляування енергії, збільшення пропускної здатності, а також покращення здатності регулювання попиту [18]. Інший адміністративний захід забезпечення гнучкості полягає в тимчасовому обмеженні виробництва електроенергії з ВДЕ, якщо виникає загроза безпечній роботі системи або коли окремі лінії електропередачі не здатні пропускати додаткові обсяги електроенергії. Це називається «обмеженням виробництва».

Позитивні ефекти використання обмеження виробництва як варіанту гнучкої диспетчеризації залежать від розрахунку в динамічному режимі розміру необхідних оперативних резервів, які зазвичай проводяться операторами системи з метою врівноваження спонтанного дисбалансу в постачанні та попиті на електроенергію або дисбалансу в результаті надзвичайних подій, таких як втрата суттєвих обсягів генерації. Існує дві найважливіші причини, коли оператор системи може обмежити постачання з об'єктів відновлюваною енергетики [18]:

1) щоб зменшити фактичний надлишок постачання, коли обсяг виробництва «вимушеними генераторами» та обсяг виробництва об'єктами ВДЕ перевищує попит;

2) щоб уникнути ризику регіонального перевантаження мережі передачі чи розподілу.

В режимі обмеження виробництва електроенергії з ВДЕ знижується потреба у оперативних резервах, а відтак знижується частка генерації електроенергії на ТЕС. Тому запровадження режиму обмеження виробництва дозволяє значно зменшити загальний обсяг викидів парникових газів об'єктами генерації. Інтеграція об'єктів відновлюваної енергетики до енергосистеми без передбачення можливості тимчасового обмеження їхнього виробництва стає дуже вартісною. Як приклад у табл. 1 наведено дані щодо обмеження виробництва (частка від загального обсягу виробництва ВЕС та СЕС) та проникнення вітрової і сонячної енергетики (обсяг виробництва електроенергії з ВДЕ/загальний попит) для Китаю та Німеччини в 2017 р. [18].

Важливо відзначити, що деякі заходи забезпечення балансування попиту та пропозицій будуть економічно ефективнішими на ранніх етапах енергетичного переходу, а деякі матимуть сенс лише на останніх етапах [19]. Наприклад, керування попитом зазвичай вважається найбільш економічно ефективним ресурсом у діючій енергетичній системі після модернізації звичайних електростанцій і гнучкості ВДЕ. Масове розгортання нових технологій накопичення енергії буде економічно доцільним і необхідним лише на подальших середньотермінових етапах енергетичного переходу, а технології сезонного зберігання, такі як синтетичний газ, будуть важливими для завершального етапу для систем, що будуть стовідсотково базуватися на ВДЕ.

Таблиця 1 – Обмеження виробництва та частка ВДЕ в електроенергетиці для Китаю та Німеччини

Країна	Загальний обсяг виробництва електроенергії, ТВт·год	Проникнення вітрової енергетики	Проникнення сонячної енергетики	Обмеження виробництва ВЕС	Обмеження виробництва СЕС
Китай	6313	5 %	2 %	12 %	6 %
Німеччина	654	18 %	7 %	5 %	< 1 %

За розрахунками фінської компанії Wärtsilä у 2018 році для України за умов, що «зелені тарифи» діють згідно з РРА (типим договором купівлі-продажу електричної енергії між гарантованим покупцем та суб'єктом господарювання, що виробляє електричну енергію з використанням ВДЕ, Power Purchase Agreement), диспетчеризація здійснюється згідно з принципом маржинального ціноутворення (тобто пріоритетна диспетчеризація більш дешевої енергії, наприклад, атомної), встановлена потужність ВЕС і СЕС на кінець 2020 р. – 7500 МВт, то вже на кінець 2020 р. **обсяг обмежень може бути досягти 30% виробництва ВДЕ** [23 – 25]. Плата за обмежену (не вироблену) енергію становитиме €580 млн. на рік (див. рис. 1) [24]. Подальше нарощування встановленої потужності ВДЕ призводитиме до ще більшої частки обмежень і не суттєво впливатиме на приріст «корисного» виробництва.

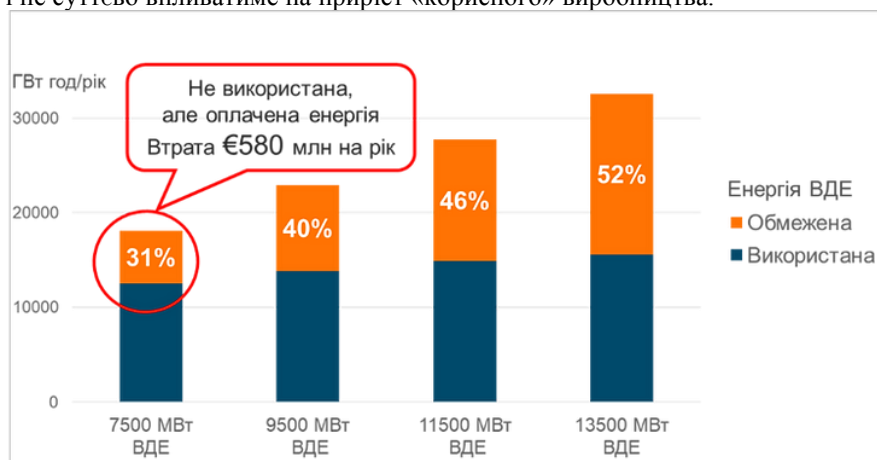


Рисунок 1 – Обмеження енергії ВДЕ залежно від встановленої потужності

Інший негативний наслідок зростання встановленої потужності ВДЕ в ОЕС України – це необхідність закупівлі все більшого обсягу вторинного «гарячого» резерву. За сценарієм «7500 МВт ВДЕ» 18,8 млрд. кВт·год на рік мають надавати вугільні ТЕС, працюючи в неефективному режимі часткового навантаження, що характеризується підвищеними викидами та більшим споживанням палива. Оскільки ринок допоміжних послуг ще не запрацював, оцінити потенційну вартість «гарячого резерву» зараз неможливо.

Крім того, для створення достатніх резервів «на валу» ТЕС необхідно тримати збільшений обсяг працюючих частково навантажених вугільних блоків. Таке вимушене зростання частки теплової генерації може бути реалізовано лише шляхом відключення відповідної кількості атомних блоків. Ця ситуація відома як «зелено-вугільний парадокс»: без додаткових інвестицій у підвищення гнучкості енергосистеми розвиток «чистої» енергетики призводить до зростання «брудної» вугільної генерації та обмеження дешевої атомної [23, 24]. Негативний фінансовий ефект такого сценарію вимірюється кількома сотнями мільйонів євро на рік.

Основні очікувані результати застосування високоманевреної генерації [23]:

– зменшення обмеження ВДЕ більш як утричі – з 6,5 до 1,9 млрд. кВт год на рік (цілком позбутися обмеження в існуючій енергосистемі неможливо);

– зменшення використання «гарячого» резерву ТЕС на 12,5 млрд. кВт год на рік;

– зменшення обсягу вугільної генерації на 4,2 млрд. кВт год на рік;

– загальне скорочення споживання вугілля на 72 544 ТДж на рік (приблизно 3 млн т);

– несуттєве споживання газу газопоршневими станціями «холодного» резерву – 40 млн. м<sup>3</sup> на рік на встановлену потужність у 2 ГВт;

– зниження викидів CO<sub>2</sub> на 7 млн. т на рік;

– скорочення експлуатаційних витрат ОЕС України (включно з паливом) на 300 млн. євро на рік.

Гнучкість великих енергосистем буде також визначатися гнучкістю електроенергетичних систем нижчого рівня (підсистем). На гнучкість електроенергетичних систем регіонального та локального рівня вже досить суттєво буде впливати керування енергоспоживанням окремих споживачів, керування попитом мікрорайонів чи промислових вузлів. У свою чергу, гнучкість ЛЕС буде визначатися керованістю розосередженою генерацією (ВДЕ), механізмами керування попитом, застосуванням акумуляторів, реалізацією механізмів гнучкості при прогнозуванні навантаження чи використання методів економічного аналізу.

На регіональному та локальному рівні широке впровадження ВДЕ в електромережі спричинила постановку нових завдань, спрямованих на підвищення ефективності функціонування елементів локального ринку, а саме ВДЕ [8, 10, 26]. Фактори, що погіршують балансову надійність систем енергозабезпечення [26]:

– ускладнення керування режимами електричних мереж;

– поява надлишкової потужності, що зумовлює труднощі з регулюванням частоти;

– виникнення реверсивних перетікань потужності в мережах високої напруги в розподільних мережах;

– необхідність забезпечення стійкості роботи енергосистеми за відключення (або включення) великої кількості ВДЕ;

– поява в структурі електричних мереж ВДЕ, що мають імовірнісний характер генерування потужності;

– складність узгодження графіків генерування ВДЕ та електроспоживання.

Водночас особливістю ЛЕС є потреба в оптимізації складу генеруючих потужностей та їх характеристик, режимів сумісної роботи [27]. Така оптимізація має враховувати особливості споживання енергії, вимоги до надійності забезпечення, наявний потенціал відновлюваних джерел енергії (сонячної, вітрової), вартісні показники. Зокрема, при роботі разом з резервним джерелом енергії на основі двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ) до оцінки надійності додається вимога мінімізації витрат палива при максимальному використанні ВДЕ, а також зниження собівартості енергії. Тут критеріями роботи системи будуть не лише показники надійності (її може забезпечити традиційна генерація), а й економічні та екологічні критерії. Складовими критеріями оптимізації можна визначити [27]:

– мінімум очікуваного небалансу;

– обмеження щодо режиму роботи резервного джерела;

– обмеження з надлишку або дефіциту енергії;

– мінімізація вартості обладнання.

Колівання енергобалансу необхідно компенсувати за рахунок зміни потужності інших, традиційних джерел, для чого необхідна наявність відповідного діапазону регулювання на них, додатково до необхідного для покриття змін навантаження споживачів і забезпечення нормативної якості електроенергії.

Крім того, практики керування попитом на сьогодні здійснюються за трьома напрямками: ресурси та інфраструктура (системи енергорозподілу конструюються з врахуванням контролерів динамічного

навантаження, які виконують роль балансу напруги в мережі; споживачі (побутові, комерційні та промислові); ринки (ринок керування попитом пропонує енергоринку послуги) – також потребує деталізації аналізу процесів енергообміну [5, 6]. Слід враховувати, що наразі ВДЕ, інтегроване з системою накопичення акумуляторів, уже конкурентоспроможне за ціною з деякими традиційними джерелами, і їх впровадження підвищить надійність мережі.

### Особливості аналізу процесів енергообміну в ЛЕС

Суть обмінних процесів у перетинах ЛЕС покажемо на прикладі послідовного з'єднання генератора (Г) та навантаження (Н) [28, 29]. Розглянемо процеси, які протікають у контрольованому перетині між генератором та навантаженням. Для системи виділимо інтервали  $t^+$ ,  $t^0$ ,  $t^-$ , на яких для миттєвої потужності  $p(t)$  виконуються співвідношення:  $p(t) = p^+(t) > 0$ ,  $p(t) = p^-(t) < 0$  та  $p(t) = 0$ . Будемо враховувати, що на інтервалі  $t^0$  відбуваються перетворення електромагнітної енергії накопичувачів у інші види, але ні самим інтервалом, ні зміною накопиченої енергії на цьому інтервалі нехтувати не можна.

Для оцінки інтенсивності енергетичних процесів використаємо поняття «обмінної енергії» через конкретний перетин системи [28]. При роботі системи з наявності інтервалу  $t^0$  на періоді  $T$  призводить до визначення обмінної енергії через виділений перетин двома способами.

При першому з них обмінну енергію через цей перетин визначимо із співвідношення:

$$W_{Об1} = DW^+ = W^+ - W^{(+)} = DW_1^- - W^{(-)} + W^- = W^{(0)} + W^{(-)} - W^-, \quad (1)$$

де  $W^+$  ( $P^+$ ) – енергія (середня потужність), яка надходить від генератора в навантаження;  $W^-$  ( $P^-$ ) – енергія (середня потужність), яка повертається до генератора від навантаження;  $W^{(+)}$  ( $P^{(+)}$ ),  $W^{(0)}$  ( $P^{(0)}$ ),  $W^{(-)}$  ( $P^-$ ) – енергія (середня потужність), яка перетворюється в навантаженні в інші види відповідно на інтервалах  $t^+$ ,  $t^0$ ,  $t^-$ ;  $\Delta W_A^+$ ,  $\Delta W_1^-$ ,  $\Delta W_2^-$  – зміни енергії, яка накопичена в накопичувачах електромагнітної енергії навантаження, відповідно на інтервалах  $t^+$ ,  $t^0$ ,  $t^-$ .

Тобто обмінна енергія  $W_{Об1}$  дорівнює енергії, яка надійшла від генератора до навантаження ЛЕС протягом інтервалу часу  $t^+$ , за винятком енергії, яка перетворюється в інші види в навантаженні за цей же інтервал часу. Крім того,  $W_{Об1}$  дорівнює сумі енергій, яка перетворюється в інші види протягом інтервалів  $t^0$  та  $t^-$  і повертається до генератора протягом інтервалу  $t^-$ .

У другому способі обмінну енергію через контрольований перетин визначимо як енергію, що дорівнює енергії, накопиченій у навантаженні в кінці інтервалу часу  $t^0$ :

$$W_{Об2} = W^+ - W^{(+)} - DW_1^- = W^+ - W^{(+)} - W^{(0)} = DW^+ - DW_1^- = W^{(-)} - W^-, \quad (2)$$

тобто обмінна енергія  $W_{Об2}$  дорівнює енергії, яка надходить від генератора до навантаження протягом інтервалу часу  $t^+$ , за винятком енергії, яка перетворюється в інші види протягом інтервалів  $t^+$  та  $t^-$ . Крім того,  $W_{Об2}$  дорівнює сумі енергій, перетвореної в інші види за інтервал  $t^-$  та поверненої генератору за цей же інтервал часу. Використовуючи миттєву потужність накопичення  $p_H(t)$  в перетині, співвідношення (1), (2) запишемо у такому вигляді:

$$W_{EX1} = \int_0^{t^+} p^+(t) dt - \int_0^{t^+} p_0(t) dt - \int_0^{t^+} p_n(t) dt; \quad (3)$$

$$W_{EX2} = \int_0^{t^+ + t^0} p^+(t) dt - \int_0^{t^+ + t^0} p_0(t) dt = \int_0^{t^+ + t^0} p_n(t) dt. \quad (4)$$

Обмінні потужності  $Q_{EX1}$  та  $Q_{EX2}$  визначимо із наступних формул:

$$Q_{EX1} = \left( \int_0^{t^+} p_H(t) dt \right) / T; \quad Q_{EX2} = \left( \int_0^{t^+ + t^0} p_H(t) dt \right) / T. \quad (5)$$

Враховуючи попередні співвідношення (1) – (4), які відповідно відображають баланс складових електроенергії на інтервалах  $t^+$ ,  $t^0$ ,  $t^-$ , то можемо записати рівність

$$P = ((W^{(+)} + \Delta W^+) + (W^{(0)} - \Delta W_1^-) + (W^{(-)} - \Delta W_2^-)) / T. \quad (6)$$

Оскільки на інтервалі  $t^0$  енергія перетворюється в інші види за рахунок енергії, накопиченої в накопичувачах, то активну потужність  $P$  запишемо як  $P = P^+ + P^-$ , де  $P^+ = (W^{(+)} + \Delta W^+) / T$ ;  $P^- = (W^{(-)} - \Delta W_2^-) / T$ .

Вираз (6) для активної потужності  $P$  представимо як

$$P = P^{(+)} + P^{(0)} + P^{(-)} = P^+ + P^-. \quad (7)$$

У відповідності з (6) у співвідношенні (7) не можна виділити складові в доданках  $P^+$ ,  $P^-$ , які відповідають  $P^{(+)}$ ,  $P^{(0)}$ ,  $P^{(-)}$ . Величини  $P^{(+)}$ ,  $P^{(0)}$ ,  $P^{(-)}$  визначаються, коли в математичній моделі навантаження системи відомі числові значення активних опорів, а також миттєві струми чи напруги на них.

Величини  $Q_{EX1}$  та  $Q_{EX2}$  є інтегральними характеристиками впливу різних факторів неякості електроенергії на обмінні процеси в системі. Потужності  $Q_{EX1}$  та  $Q_{EX2}$  визначаються у перетині ЛЕС поза залежністю від характеру протікання енергетичних процесів в окремих елементах в середині виділених еквівалентних підсхем (визначаються на зовнішніх зажимах підсистем) [28]. Коли на початку періоду  $T$ , який визначається функцією напруги генератора  $u(t)$ , виконується умова  $p(t) = u(0)i(0) < 0$ , то мають місце нерівності  $Q_{EX1} > 0$ ,  $Q_{EX2} > 0$ . При виконанні умови  $p(t) = u(0)i(0) = 0$  значення обмінних потужностей буде від'ємне:  $Q_{EX1} < 0$ ,  $Q_{EX2} < 0$ .

У табл. 2 наведено співставлення спроможності відображення різних сторін енергетичних процесів у перетинах системи за допомогою реактивних потужностей, що визначені за класичною теорією, та обмінних потужностей []. Наведені дані показують можливі сфери практичного використання обмінної потужності при аналізі енергетичних процесів у ЛЕС, зокрема, реалізації окремих технологій балансування попиту та пропозицій.

Таблиця 2 – Співставна узагальнена характеристика обмінної потужності

Характеристика різних аспектів протікання енергетичного процесу	Реактивна потужність, визначена за класичною теорією	Обмінна потужність
Однозначне відображення обмінних процесів (індикація умови $W^- \neq 0$ )	-	+
Накопичення енергії в реактивних елементах (характеристика енергоємності та екстремальних режимів роботи реактивних елементів)	-	+
Наявність взаємокомпенсації реактивних потужностей різних гармонік (можливість існування умови рівності нулю реактивної потужності при $i_p(t) \neq 0$ )	+	-
Відображення енергообміну при наявності різнойменних гармонік струму та напруги в перетині системи	-	+
Відображення обмінних процесів між генераторами струму та напруги	-	+
Оцінка обмінних процесів у перехідних режимах	-	+
Співставлення обмінних процесів у різних перетинах системи	-	+
Оцінка взаємного впливу елементів системи, які характеризуються різним гармонічним складом напруги $u(t)$ та струму $i(t)$	-	+
Оцінка стійкості режимів роботи за рахунок введення граничних значень величин характеристик	-	+
Врахування значень кутів струму $\psi_k^i$ та напруги $\psi_k^u$ ( $k > 1$ ) для вищих гармонік	-	+
Індикація наявності реактивної потужності у системи з нелінійним нестационарним опором при відсутності реактивних елементів	+	-
Відображення генерації реактивної потужності в системі	+	-
Виділення гармонічних $p_{\Gamma}(t)$ та міжгармонічних $p_{M\Gamma}(t)$ складових миттєвої потужності $p(t)$	+	-
Однозначне усунення зворотних потоків енергії при компенсації відповідної характеристики	-	+

**Розрахунок обмінних потужностей.** В залежності від ступеня деталізації аналізу системи можна отримати різні розрахункові співвідношення для обчислення величин  $p(t)$ ,  $p_0(t)$ ,  $Q_{EX1}$  та  $Q_{EX2}$  [28]. Вибір конкретного розрахункового співвідношення обумовлюється як заданою похибкою обчислення, так і можливістю вимірювання параметрів системи. Розглянемо визначення  $Q_{EX1}$  та  $Q_{EX2}$  при постійній інтенсивності перетворення електромагнітної енергії в інші види

Справедливими у цьому випадку є тотожності  $W^{(+)} = Pt^+$ ;  $W^{(0)} = Pt^0$ , із урахуванням яких формули (3), (4) перетворюються до виду:

$$W_{EX1} = W^+ - Pt^+ = P^+(t^- + t^0) - P^-t^+; \quad (8)$$

$$W_{EX2} = W^+ - Pt^+ - Pt^0 = P^+t^- - P^-(t^+ + t^0). \quad (9)$$

Вирази (8), (9) відповідають обмінним потужностям

$$Q_{EX1} = \left( P^+ (t^- + t^0) - P^- t^+ \right) / T; \quad (10)$$

$$Q_{EX2} = \left( P^+ t^- - P^- (t^+ + t^0) \right) / T. \quad (11)$$

Зазначимо, що послідовність чергування інтервалів  $t_A^+$ ,  $t_A^0$ ,  $t_A^-$  на періоді роботи системи бути довільною, кожний із інтервалів може складатися з кількох підінтервалів, не пов'язаних між собою. У цьому випадку визначення активних та обмінних потужностей залишається незмінним, хоча у відповідних формулах необхідно враховувати поділ часових інтервалів та величин  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $W^{(+)}$ ,  $W^{(0)}$  на складові частини.

Для обмінних енергій виконується співвідношення

$$\Delta W_{EX} = W_{EX1} - W_{EX2} = (W^+ + W^-)t^0/T = Pt^0.$$

Прикладом реактивної потужності, визначеної за допомогою обмінних процесів, є реактивна потужність на основі визначення обмінної потужності  $Q_{EX}$  за умови постійної інтенсивності перетворення електроенергії в інші види протягом періоду  $T$ :

$$Q_{EX} = \frac{1}{T} \int_0^{t^+} u(t) i_p(t) dt, \quad (12)$$

де  $i_p(t) = i(t) - i_a(t)$  – реактивна складова струму;  $i_a(t) = u(t)P/U^2$  – активна складова струму;  $i(t)$  – повний струм в ланцюзі;  $P$  – активна потужність;  $U$  – діюче значення напруги. Зазначимо, що величину  $Q_{EX,P}$ , визначену з урахуванням реактивного струму  $i_p(t)$ , можемо записати у вигляді

$$Q_{EX,P} = \frac{T}{2T} \int_0^T |u(t) i_p(t)| dt / 2T. \quad (13)$$

Згідно зі співвідношенням (12) та (13) величини  $Q_{EX}$  та  $Q_{EX,P}$  можна розглядати як інтегральну характеристику при виборі компенсатора, призначеного для компенсації реактивного струму  $i_p(t)$ .

Величина  $Q_{EX}$  також може розглядатися як інтегральна характеристика впливу різних факторів неякості електроенергії на обмінні процеси в системі змінного та постійного струму, яка обчислюється за наступним виразом:

$$Q_{EX} = \frac{1}{T} \int_0^T |p_{EX}(t)| dt; \quad (14)$$

$$Q_{EX} = \frac{1}{T} \int_0^T |p_H(t)| dt, \quad (15)$$

де  $p_H(t) = u(t) \cdot i_p(t)$ , причому рівняння (15) дозволяє визначити обмінні потужності для системи постійного струму (для, оскільки у лініях постійного струму енергія споживається на першій гармоніці тому всі вищі гармонійні складові є виключно реактивні, оскільки вони не передають енергію від джерела живлення).

Для прикладу розглянемо макромодель системи (рис. 2), де еквівалентне джерело напруги  $e(t)$  характеризує результуючу несинусоїдальну напругу  $u(t)$ , яка формується всіма джерелами системи в перетині  $A-A$ , а еквівалентне джерело струму  $J(t)$  визначає несинусоїдальний струм  $i(t)$ , що протікатиме через перетин  $A-A$  системи.

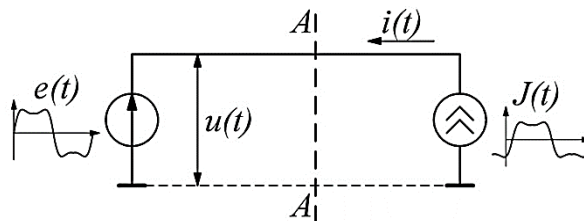


Рисунок 2 – Макромодель системи з виділенням еквівалентних джерела напруги  $e(t)$  та струму  $J(t)$



Припустимо, що напруга  $u(t)$  на періоді  $T$  має форму меандра з амплітудою  $U$ , а функція струму -  $i(t)$  також є меандром з періодом  $T$  і амплітудою  $I$ , однак ця функція зсунута відносно початку координат на інтервал  $t_1$ . Згідно співвідношення (12) при  $i^0 = 0$  формула для визначення обмінної потужності  $Q_{EX}$  має вигляд  $Q_{EX} = UI \cdot (1 - 4t_1 / T)$ .

**Баланс складових електричної енергії ЛЕС на основі обмінних процесів.** Підведення фізично обгрунтованого балансу електроенергії в ЛЕС є базовою процедурою досягнення оптимальних режимів при балансуванні та має ґрунтуватися на розрахунку енергетичних характеристик і показників та енергетичних функцій як на інтервалі часу, так і на всьому періоді роботи системи [28]. Поширене використання гармонічного аналізу електромагнітних процесів у системі зумовлює також необхідність розробки процедур підведення балансу складових електроенергії на основі спектрів сигналів, що має свої недоліки [28].

Баланс на основі миттєвих процесів – підведення фізично обгрунтованого балансу складових електроенергії базується на використанні миттєвих характеристик на виділених ЕНС, тобто інтервалах часу, коли в ЛЕС через контрольовані перетини напрямки потоків енергії залишаються незмінними (інтервалах сталості структури ЛЕС) [28]. Виведені рівняння (5), (10), (11) балансу складових електроенергії з урахуванням обмінних потужностей  $Q_{EX1}$  та  $Q_{EX2}$  підтверджують необхідність при формуванні балансу електроенергії в ЛЕС оперувати з процесами на кожному з інтервалів сталості структури.

Для відображення реальних фізичних процесів у системі будемо враховувати напрямки потоків енергії в контрольованих перетинах системи, використовуючи ЕНС системи [28]. Використаємо далі позначення:  $n_{ЕНС}$  – число енергетично незмінних станів схеми;  $n_{ГГ}$ ,  $n_{ГС}$  – число генераторів;  $n_{НГ}$ ,  $n_{НС}$  – число навантажень, які працюють відповідно у режимах генерації (індекс «Г») та споживання (індекс «Н») електроенергії;  $W_{ГГ}(W_{ГС})$  та  $W_{НГ}(W_{НС})$  – енергія, що генерується (споживається) генераторами та генерується (споживається) навантаженнями.

Баланс складових електроенергії у системі для множини контрольованих перетинів у відповідності до (5) та з врахуванням напрямків потоків енергії визначимо виразом

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^{N_{EIS}} \left[ \sum_{j=1}^{n_{GGj}} W_{GG,f1(i,j)} + \sum_{k=1}^{n_{LGj}} W_{LG,f2(i,k)} \right] - \\ & - \left[ \sum_{l=1}^{n_{LCj}} W_{LC,f3(i,l)} + \sum_{m=1}^{n_{GLj}} W_{GC,f4(i,m)} \right] \Big| J \Big| = 0, \end{aligned} \quad (16)$$

де  $f_1$ – $f_4$  – функції цілочисельних змінних, які встановлюють зв'язок між порядковим номером генератора чи навантаження, ЕНС системи та індексами  $j, k, l, m$ .

Величини  $n_{ЕНС}$ ,  $n_{ГГ,j}$ ,  $n_{НГ,j}$ ,  $n_{ГС,j}$ ,  $n_{НС,j}$ , складові енергії, вигляд функцій  $f_1$ – $f_4$  визначаються на основі розрахунків чи вимірювання струмів і напруг в контрольованих перетинах з подальшою ідентифікацією параметрів системи. У співвідношенні (16) всі складові суми по  $i$  дорівнюють нулю, тому баланс (20) має місце й для кожного ЕНС системи. Відзначимо, що усереднення (16) на періоді  $T$  призводить лише до збалансування режимів ЛЕС за середніми значеннями активної потужності.

Оскільки енергія, що надходить в навантаження, накопичується та перетворюється в інші види, то для кожного ЕНС запишемо

$$W_{LC} = W_{EX,LC} + W_{LC}^{(+)}. \quad (17)$$

Аналогічно для енергії, що повертається в навантаження, є вірною рівність

$$W_{LG} = W_{EX,LG} - W_{LG}^{(-)}. \quad (18)$$

Зв'язок між  $W_{Об1,Н}$  та  $W_{Об2,Н}$  для одного й того ж навантаження визначається як

$$W_{EX1,L} - W_{EX2,L} = W_L^{(0)}. \quad (19)$$

Співвідношення (17) – (19) дають можливість для кожного ЕНС системи в (16) побудувати рівності, що пов'язують між собою величини  $W_{ГГ}$ ,  $W_{ГС}$ ,  $W_{EX1}$ ,  $W_{EX2}$ ,  $W^{(+)}$ ,  $W^{(-)}$ ,  $W^{(0)}$ .

Визначення обмінних потужностей, складових балансу енергій на конкретних ЕНС передбачає знаходження моментів переходу функції миттєвої потужності  $p_j(t)$   $j$ -го контрольованого перетину через нуль.

Алгоритм розрахунку балансу складових електроенергії в системі на основі співвідношень (16) – (19) легко формалізуються та передбачає оперування з матрицями, що обумовлює можливість їх ефективного реалізації за допомогою сучасних програмно-апаратних засобів.

Якщо баланс складових електроенергії розраховується для всіх елементів системи, то наочне представлення результатів підведення балансу складових електроенергії здійснюється за допомогою графів зміни стану  $\Gamma_{ЗС}\{V_{С}, H_{ЗС}\}$  та передачі енергії  $\Gamma_{ПЕ}\{V_{ПЕ}, H_{ПЕ}\}$ . Для подальшого використання результати розрахунку складових балансу зводяться в матриці  $B_{C1}(i,j)$  та  $B_{C2}(i,j)$  розмірністю відповідно  $n_{ЕНС} \cdot n_L$  та  $n_{ЕНС} \cdot (n_{ГГ} + n_L)$  [28]. У цих матрицях  $i$ -й рядок відповідає складовим балансу для  $i$ -го енергетично

незмінного стану,  $j$ -й стовпець матриці  $B_{C1}$  відповідає  $j$ -й електричній лінії ( $j$ -й дузі графа  $\Gamma_{3C}\{V_{3C}, H_{3C}\}$ ),  $j$ -й стовпець матриці  $B_{C2}$  при  $j = 1, \dots, n_{\Gamma} - j$ -му генератору та при  $j = n_{\Gamma} + 1, \dots, n_{\Gamma} + n_H$  відповідає  $(j - n_{\Gamma})$ -у навантаженню схеми.

Для елементів матриці  $B_{C1}$  виконуються умови:

1)  $W_{Ge,i} = \prod_{j=1}^{n_L} b_{C1}(i, j) (j/b_{C1}(i, j) > 0)$  – обсяги енергії, передані на  $j=1$ -му ЕНС в режимі генерації через всі лінії ЛЕС;

2)  $W_{Ce,i} = \prod_{j=1}^{n_L} b_{C1}(i, j) (j/b_{C1}(i, j) < 0)$  – обсяги енергії, передані на  $i$ -му ЕНС в режимі споживання через всі лінії ЛЕС;

3)  $W_{A,i} = \prod_{j=1}^{n_{EIS}} b_{C1}(i, j)$  – величина активної енергії, переданої через  $j$ -ту лінію на виділеному періоді роботи системи.

Для матриці  $B_{C2}$  значення  $b_{C2}(i, j)$  для  $i$ -го ЕНС відповідає величині енергії, що генерується (знак «+») чи споживається (знак «-»)  $j$ -м елементом системи, причому нульове значення відображає відключення  $j$ -го елемента від системи. Для елементів матриці  $B_{C2}$  виконуються умови:

1)  $W_{GGe,i} = \prod_{j=1}^{n_G} b_{C2}(i, j) (j/b_{C2}(i, j) > 0)$  – величина енергії, що генерується генератором на  $i$ -му ЕНС;

2)  $W_{Gce,i} = \prod_{j=1}^{n_G} b_{C2}(i, j) (j/b_{C2}(i, j) < 0)$  – величина енергії, що споживається генераторами на  $i$ -му ЕНС;

3)  $W_{LGe,i} = \prod_{j=n_G+1}^{n_G+n_L} b_{C2}(i, j) (j/b_{C2}(i, j) > 0)$  – величина енергії, що генерується навантаженнями на  $i$ -му ЕНС;

4)  $W_{Lce,i} = \prod_{j=n_G+1}^{n_G+n_L} b_{C2}(i, j) (j/b_{C2}(i, j) < 0)$  – величина енергії, що споживається навантаженнями на  $i$ -му ЕНС;

5)  $W_{GGe,i} = \prod_{j=1}^{n_G} b_{C2}(i, j) (j/i = 1, \dots, n_G)$  – величина енергії, що генерується  $j$ -м генератором на періоді  $T$ ;

6)  $W_{Ae,i} = \prod_{i=1}^{N_{EIS}} b_{C2}(i, j) (j/i = n_G + 1, \dots, n_G + n_G)$  – величина енергії, що споживається  $(j - n_{\Gamma})$ -м навантаженням на періоді  $T$ .

Величини  $W_{\Gamma\Sigma,i}$ ,  $W_{\Gamma\Sigma,i}$ ,  $W_{H\Sigma,i}$ ,  $W_{H\Sigma,i}$  відповідно дорівнюють значенням сум  $j$ ,  $m$ ,  $k$ ,  $l$  за співвідношеннями (16). Спільний розгляд співвідношень типу (17) – (19), побудованих для конкретних структур ЛЕС, дозволяє установити розрахункові співвідношення, що відображають не тільки баланс за середніми значеннями активної потужності, але й баланс складових електроенергії, який адекватно відображає обмінні процеси в системі. За наведеними співвідношеннями можна сформулювати відповідну матрицю стану системи.

**Аналіз взаємного впливу елементів системи на основі обмінних процесів.** Електромагнітнусаумісність (ЕМС) можна розглядати як складову балансування попиту та пропозицій, зокрема, при оцінці рівня балансування [29, 30]. Взаємний вплив елементів системи будемо оцінювати для конкретного розрахованого режиму його роботи. При аналізі взаємного впливу елементів використаємо інтегральну модель на основі розділення сумарного струму на активну та реактивну складові [28]. Аналіз передбачає врахування впливу різних факторів неякісності електроенергії. До факторів неякісності електроенергії при оцінці ЕМС будемо відносити зміни форми сигналів  $u(t)$ ,  $i(t)$ , що обумовлюють відхилення, провали та зміни напруги, спотворення синусоїдальності кривої напруги та струму, несиметрію напруги та струму, появу імпульсів напруги та тимчасової перенапруги.

Поряд з критеріями ефективності енергетичних процесів, для оцінки взаємного впливу елементів ЛЕС в якості критеріїв можуть також бути вибрані критерії, що відображають відмінність від оптимального режиму, в тому числі відмінність від синусоїдального режиму, рівні реактивної потужності

за першою та вищими гармоніками, складовими втрат, характер протікання обмінних процесів.

Безпосередньо рівень ЕМС в перетині системи оцінимо згідно з показниками  $\Delta_{B1}$ ,  $\Delta_{B2}$ ,  $\Delta_{B3}$  (по мірі зниження значимості показника), які визначимо із співвідношень:

$$\Delta_{B1} = \int_0^T (u(t) / i(t) - R_{||}) dt / (TR_{||}), \text{ де } R_{||} = U^2 / P; \quad (20)$$

$$\Delta_{B2} = Q_{EX} / P; \quad (21)$$

$$\Delta_{B3} = Q / Q_{EX} - p. \quad (22)$$

Якщо показники  $\Delta_{B1}$  та  $\Delta_{B2}$  (співвідношення (20) та (21)) відображають відповідно критерії мінімуму втрат та усереднення зворотних потоків енергії, то показник  $\Delta_{B3}$  (співвідношення (22)) є інтегральною характеристикою наближення енергетичного процесу до синусоїдального. Міру оцінки взаємного впливу елементів на основі показників  $\Delta_{B1}$ ,  $\Delta_{B2}$ ,  $\Delta_{B3}$  можна визначити ступенем їх наближення до нуля.

Для оцінки дольового внеску споживачів обмінні процеси у перетині ЛЕС для заданої діючої напруги генератора  $u(t)$  розділимо за першою (індекс «1»), однією  $j$ -ю вищою (індекс « $j$ »), всіма вищими (індекс « $\infty$ ») та всіма (індекс « $\Sigma$ ») гармоніками згідно з наступними виразами:

$$Q_{EX}^{(1)} = \frac{1}{2T} \int_0^{t^+} u(t) I_{m(1)} \sin(\omega t - \psi_1^i) dt; \quad (23)$$

$$Q_{EX}^{(j)} = \frac{1}{2T} \int_0^{t^+} u(t) I_{m(j)} \sin(j\omega t - \psi_j^i) dt; \quad (24)$$

$$Q_{EX}^{(j)} = \frac{1}{2T} \int_0^{t^+} u(t) I_{m(j)} \sin(j\omega t - \psi_j^i) dt; \quad (25)$$

$$Q_{EX}^{(\Sigma)} = \frac{1}{2T} \int_0^{t^+} u(t) \left( \sum_{k=1}^{N_r} I_{m(k)} \sin(\omega t - \psi_k^i) \right) dt. \quad (26)$$

Для оцінки дольового внеску споживачів на погіршення якості електроенергії в точці загального підключення можливі два підходи. Перший базується на оцінці впливу елементів системи оцінюється поза залежністю від попередніх режимів роботи як системи в цілому, так і конкретних його елементів, а кількісні показники взаємного впливу визначаються сумою впливів для кожного з виділених факторів неякості електроенергії з врахуванням критерію мінімуму втрат електроенергії. Загальний вплив у перетині обумовлюється сумою впливів всіх елементів, що підключені до виділеного перетину.

Виділення внеску  $j$ -го елемента у спотворення електроенергії у перетині ЛЕС передбачає формування інтегральної моделі оцінки взаємного впливу і розщеплення моделі системи на дві ортогональні складові, які відображають відповідно протікання активного та реактивного струмів. Далі здійснюється розрахунок обмінних потужностей у розщепленій моделі на основі реактивної складової струму згідно зі співвідношеннями (8), (9).

Другий підхід передбачає оцінку зміни величин обмінних потужностей як функцій від окремих змінюваних параметрів, наприклад, згідно з коефіцієнтом впливу (чутливістю)  $S_j^i$  зміни обмінної потужності  $Q_{EX,i}$   $i$ -го елемента від зміни параметра  $P_j$   $j$ -го елемента системи  $k_{Q,P} = S_j^i = \Delta_{Q_{B,j}} / \Delta P_j$ .

Виділення внеску  $j$ -го елемента у спотворення електроенергії у перетині ЛЕС розглянемо на прикладі використання інтегральної моделі згідно з критерієм мінімуму втрат електроенергії. Алгоритм оцінки взаємного впливу характеризується такою послідовністю кроків:

- 1) проведення аналізу електромагнітних процесів;
- 2) формування інтегральної моделі оцінки взаємного впливу;
- 3) розщеплення моделі системи на дві ортогональні складові;
- 4) розрахунок обмінних процесів у розщепленій моделі на основі реактивної складової струму, наприклад, згідно зі співвідношеннями (23) – (26);
- 5) оцінка впливу  $j$ -го елемента схеми із співвідношення:

$$K_{Q_{e,j}} = Q_{EX,j} / Q_{EXS}; \quad (27)$$

$$Q_{EXS} = \mathbf{e} \prod_{j=1}^{nu} Q_{EX,j}; \quad \mathbf{e} \prod_{j=1}^{neu} K_{Q_{e,j}} = 1, \quad (28)$$

Співвідношення (27) та (28) дають можливість в наближеному вигляді оцінити внесок  $j$ -го елемента у спотворення електроенергії у перетині ЛЕС.

**Формування оптимізаційної задачі при реалізації технологій балансування (гнучкості) в ЛЕС**

При реалізації технологій балансування (гнучкості) необхідно вирішувати оптимізаційні задачі. Формування такої оптимізаційної задачі (визначення критеріїв) для системи, що містить акумуляторні батареї, наведено нижче.

Традиційний підхід до оцінки правильності конфігурації системи полягає у забезпеченні балансової надійності або заданого графіка генерації / споживання електроенергії. Загалом можна розглядати баланс потужності та баланс енергії, хоча ці фізичні величини пов'язані. Для ЛЕС з акумуляторними батареями на перший план виходять показники забезпечення попиту. При оцінці економічних показників системи потрібно зважати також на оптимальне використання виробленої енергії.

Формування оптимізаційних задач має здійснюватися з врахуванням обмінних процесів в ЛЕС в залежності від ролі та функцій навантажень: вимоги до графіків електрогенерації та електроспоживання (режимів роботи), їх характеристик та показників, як елементів оптимізація. Формування оптимізаційної задачі можливо здійснювати при виконанні однієї або кількох умов:

- власне споживання (автономна робота, DSM);
- кооперативне споживання (локальне), DMS;
- продаж електроенергії в централізовану систему через агрегатор, DSM.

При формулюванні задачі оптимізації необхідно врахувати, що як критерії на початковому етапі оптимізації можуть застосовуватися економічні та технічні складові, а як обмеження – соціальні та екологічні обмеження (наприклад, екологічна прийнятність чи затребуваність).

Виникає задача уточнення складових оптимізаційної задачі, яку, наприклад, доцільно вирішувати з врахуванням потужності Фризе [29].

Сформулюємо можливі варіанти балансу миттєвих потужностей у ЛЕС з виділенням миттєвих потужностей сонячної батареї  $p_{CB}(t)$ , акумуляторної батареї  $p_{AB}(t)$ , централізованої мережі  $p_M(t)$  та власне навантажень споживача  $p_H(t)$

$$p_{CB}(t) + p_M(t) + p_{AB}(t) = p_H(t); \quad (29)$$

$$p_{CB}(t) + p_M(t) - p_{AB}(t) = p_H(t); \quad (30)$$

$$p_{CB}(t) - p_M(t) + p_{AB}(t) = p_H(t); \quad (31)$$

$$p_{CB}(t) - p_M(t) - p_{AB}(t) = p_H(t). \quad (32)$$

Із співвідношень (29) – (32) у подальшому можуть бути отримані баланси потужностей при відборі потужності від одного генератора (33) – (35), а також при роботі групи з двох генераторів (36) – (39):

$$p_{CB}(t) = p_H(t); \quad (33)$$

$$p_M(t) = p_H(t); \quad (34)$$

$$p_{AB}(t) = p_H(t); \quad (35)$$

$$p_{CB}(t) + p_M(t) = p_H(t); \quad (36)$$

$$p_{CB}(t) - p_{AB}(t) = p_H(t); \quad (37)$$

$$p_{CB}(t) + p_{AB}(t) = p_H(t); \quad (38)$$

$$p_{CB}(t) - p_M(t) = p_H(t). \quad (39)$$

У наведених співвідношеннях мають місце наступні умови:

- 1) знак «+» перед  $p_M(t)$  означає, що миттєві потужності від централізованої мережі додаються до миттєвих потужностей, що виробляються сонячною батареєю, для забезпечення потреб споживача;
- 2) знак «-» перед  $p_M(t)$  означає, що миттєві потужності від централізованої мережі віднімаються від миттєвих потужностей, що виробляються сонячною батареєю, для забезпечення потреб споживача;
- 3) знак «+» перед  $p_{AB}(t)$  означає, що миттєві потужності від акумуляторної батареї додаються до миттєвих потужностей, що виробляються сонячною батареєю, для забезпечення потреб споживача;
- 4) знак «-» перед  $p_{AB}(t)$  означає, що миттєві потужності від акумуляторної батареї віднімаються від миттєвих потужностей, що виробляються сонячною батареєю, для забезпечення потреб споживача.

Виділивши енергетично незмінні стани на періоді роботи системи  $T$  (наприклад,  $T = 24$  год) тривалістю  $t_i$  кількістю  $n_{ENS}$  та помноживши ліві та праві сторони співвідношень (29) – (39) можемо перейти до балансу енергії:

$$\sum_{i=1}^{\eta_{EHC}} W_{CBi}(t) \pm \sum_{i=1}^{\eta_{EHC}} W_{Mi}(t) \pm \sum_{i=1}^{\eta_{EHC}} W_{ABi}(t) = \sum_{i=1}^{\eta_{EHC}} W_{Hi}(t); \quad (40)$$

$$\sum_{i=1}^{\eta_{EHC}} W_{CBi}(t) = \sum_{i=1}^{\eta_{EHC}} W_{Hi}(t), \sum_{i=1}^{\eta_{EHC}} W_{Mi}(t) = \sum_{i=1}^{\eta_{EHC}} W_{Hi}(t), \sum_{i=1}^{\eta_{EHC}} W_{ABi}(t) = \sum_{i=1}^{\eta_{EHC}} W_{Hi}(t); \quad (41)$$

$$\sum_{i=1}^{\eta_{EHC}} W_{CBi}(t) \pm \sum_{i=1}^{\eta_{EHC}} W_{Mi}(t) = \sum_{i=1}^{\eta_{EHC}} W_{Hi}(t); \quad (42)$$

$$\sum_{i=1}^{\eta_{EHC}} W_{CBi}(t) \pm \sum_{i=1}^{\eta_{EHC}} W_{ABi}(t) = \sum_{i=1}^{\eta_{EHC}} W_{Hi}(t); \quad (43)$$

З врахуванням вартості електроенергії  $C$  при її генерації та споживання для виділеної множини тарифів  $\{C_1, \dots, C_j, \dots, C_{nT}\}$  з їх кількістю елементів  $n_T$  та тарифного плану ми можемо перейти до вартісних показників:

$$\sum_{i=1}^{\eta_{EHC}} W_{CBj}(t)C_j \pm \sum_{i=1}^{\eta_{EHC}} W_{Mj}(t)C_j \pm \sum_{i=1}^{\eta_{EHC}} W_{ABj}(t)C_j = \sum_{i=1}^{\eta_{EHC}} W_{Hj}(t)C_j; \quad (44)$$

$$\sum_{i=1}^{\eta_{EHC}} W_{CBj}(t)C_j = \sum_{i=1}^{\eta_{EHC}} W_{Hj}(t)C_j, \sum_{i=1}^{\eta_{EHC}} W_{Mj}(t)C_j = \sum_{i=1}^{\eta_{EHC}} W_{Hj}(t)C_j, \sum_{i=1}^{\eta_{EHC}} W_{ABj}(t)C_j = \sum_{i=1}^{\eta_{EHC}} W_{Hj}(t)C_j; \quad (45)$$

$$\sum_{i=1}^{\eta_{EHC}} W_{CBj}(t)C_j \pm \sum_{i=1}^{\eta_{EHC}} W_{Mj}(t)C_j = \sum_{i=1}^{\eta_{EHC}} W_{Hj}(t)C_j; \quad (46)$$

$$\sum_{i=1}^{\eta_{EHC}} W_{CBj}(t)C_j \pm \sum_{i=1}^{\eta_{EHC}} W_{ABj}(t)C_j = \sum_{i=1}^{\eta_{EHC}} W_{Hj}(t)C_j; \quad (47)$$

На основі наведених співвідношень (40) – (43) чи (44) – (47) можна сформулювати наступні оптимізаційні задачі:

- 1) максимальна генерація в мережу (від ВДЕ);
- 2) мінімальне споживання від мережі (без генерації ВДЕ);
- 3) максимальне власне споживання (генерація ВДЕ);
- 4) мінімізація коштів для оплати електроенергії (без ВДЕ чи з ВДЕ);
- 5) максимізація коштів за власну генерацію з врахуванням своїх потреб.

У споживача також можуть також реалізовуватися окремі програми керування попитом (DSM), наприклад, з використанням систем розосередженого керування (DMS), що має знайти своє відображення при формуванні цільової векторної функції оптимізації. Як наслідок, сформовані вище співвідношення мають бути уточнені з введенням у правих частинах співвідношень відповідно у 1-й групі (співвідношення (33) – (39)) – доданка  $(-p_{DSM}(t))$ , у другій групі (співвідношення (40) – (43)) –  $(-\sum W_{DSM}(t))$ , у третій групі (співвідношення (44) – (47)) – доданка  $(-W_{DSMj}(t)C_{DSMj})$ .

Як приклад наведемо узагальнюючі вирази для оцінки неоптимальності процесів:

$$W_1 = W_B - (W_{G,R1} + W_{S1}) \rightarrow \min; \quad (45)$$

$$W_2 = (W_{G,R2} + W_{S2}) - W_B \rightarrow \max; \quad (46)$$

$$C_{\text{плат}} = C_B - (CG_{R1} + C_{S1}) \rightarrow \min; \quad (47)$$

$$C_{\text{дохід}} = (C_{G,R2} + C_{S2}) - C_B \rightarrow \max; \quad (48)$$

Представлені вирази (45) – (48) для оцінки неоптимальності процесів дозволяють підійти до балансування ЛЕС з ВДЕ з системних позицій, враховуючи не тільки склад та режими роботи системи, але й використання різних механізмів керування попитом на електроенергію, необхідність оптимізації бізнес-процесів (формування оптимізаційної тарифної політики заданих рівнів гнучкості) з використанням вимог чи обмежень, які визначаються екологічними факторами.

## Висновки

1. Проведений аналіз показав, що у випадку традиційних електроенергетичних систем процес балансування попиту та пропозицій досягається шляхом забезпечення резервів і графіків генерації / навантаження, то у сучасних електроенергетичних системах, де суттєво зростає частка ВДЕ, вимоги до

балансування стають більш жорсткішими, що вимагає покращувати гнучкість електроенергетичних систем.

2. Суттєве зростання частки ВДЕ в системах енергозабезпечення, зокрема, в локальних електроенергетичних системах, обумовлює необхідність приймати нові правила роботи, зокрема, підвищувати рівень гнучкості, тобто здатність забезпечувати баланс попиту та пропозиції, впроваджувати нові технологічні рішення (керування попитом, акумулювання тощо), що потребує у першу чергу деталізації аналізу процесів енергообміну на регіональному та локальному рівнях – систем розподілу електроенергії, де у більшості випадків підключаються ВДЕ та проблема балансування є надзвичайно актуальною.

3. Розглянуто особливості аналізу процесів енергообміну в системах енергозабезпечення та запропоновано для вирішення задач балансування застосовувати обмінну потужність  $Q_{EX}$ , яка є інтегральною характеристикою впливу різних факторів неякісності електроенергії на обмінні процеси в системі та визначається у контрольованих перетинах системи. Запропоновано баланс енергії в перетинах ЛЕС визначати на основі оцінки обмінних процесів, а власне обмінну потужність використовувати для аналізу взаємного впливу елементів системи (рівнів ЕМС).

4. Для досягнення заданих рівнів балансування (гнучкості) в ЛЕС на основі аналізу обмінних процесів сформовано оптимізаційну задачу, особливості побудови складових якої розглянуто на прикладі ЛЕС з акумуляторною батареєю.

### Список використаної літератури

1. World Energy Transitions Outlook 2023: 1.5°C Pathway. – <https://www.irena.org/Publications/2023/Mar/World-Energy-Transitions-Outlook-2023>
2. 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.
3. Денисюк С.П., Стржелецьки Р. Формування складових інтелектуальної платформи керування енергетичними системами та мережами // Енергетика: економіка, технології, екологія. 2019. № 3. С. 7–22.
4. Conor E. Kelly, John A. Ging, Aman Kansal, Michael P. Walsh. Balancing Power Systems with Datacenters Using a Virtual Interconnector // IEEE Power and Energy Technology Systems Journal (Volume: three, Issue: 2, June 2016). P. 51–59.
5. Eddie Proffitt. Balancing the electricity system with demand side flexibility and storage. – [https://powerresponsive.com/wp-content/uploads/2021/04/NG\\_MEUC-book-2021.pdf](https://powerresponsive.com/wp-content/uploads/2021/04/NG_MEUC-book-2021.pdf)
6. <https://www.renewableenergyworld.com/solar/balancing-a-renewable-grid-what-are-the-options/#gref>
7. [https://enerhodzherela.com.ua/analitika/Балансування\\_енергетичної\\_системи](https://enerhodzherela.com.ua/analitika/Балансування_енергетичної_системи)
8. Денисюк С.П. Особливості аналізу режимів роботи енергосистем у районах з альтернативними джерелами електроенергії вітровими електростанціями. / С.П. Денисюк, П.В. Махлін, О.А. Шрам, В.М. Слинко // Технічна електродинаміка. 2022. №1. С. 41–49.
9. Жаркин А.Ф., Денисюк С. П., Попов В. А. Системы электроснабжения с источниками распределенной генерации. Київ: Наукова думка. 2017. 230 с.
10. Кириленко О.В., Жуйков В.Я., Денисюк С.П. Використання динамічної тарифікації для оптимізації техніко-економічних показників ЛЕС на локальних ринках електроенергії // Технічна електродинаміка. 2022. № 3. С. 37–48.
11. Kaneva M., Popov Z., Stoilov D. Power Balancing in Electric Power System with Considerable Wind Power Penetration // Efficacité énergétique – sources d'énergies renouvelables – protection de l'environnement COFRET'12, Sozopol, Bulgarie, 14 August 2017.
12. <https://ua-energy.org/uk/posts/balansuvannia-enerhosystemy-v-poshukakh-optymalnykh-rishen>
13. [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Nov/IRENA\\_Power\\_system\\_flexibility\\_1\\_2018.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Nov/IRENA_Power_system_flexibility_1_2018.pdf)
14. Cruz I., Plić D.D., Johansson M.T. Using flexible energy system interactions amongst industry, district heating, and the power sector to increase renewable energy penetration // Energy Efficiency. 2023. Published online: 23 June 2023, 16, Article number: 53 (2023). 22 p.
15. Semich Imprama, Secil Varbak Neseb, Bülent Oralb. Challenges of renewable energy penetration on power system flexibility: A survey // Oral Energy Strategy Reviews. Volume 31, September 2020; 100539 Operational Challenges towards Deployment of Renewable Energy.
16. Denysiuk, S., Derevianko, D. The cost-based DSM methods in LECs with DG sources. Paper presented at the 2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology, KhPI Week 2021 – Conference Proceedings, 544–548. doi:10.1109/KhPIWeek53812.2021.957009
17. 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), 19-31. doi:10.21303/2461-4262.2021.001689
18. Майснер Ф., Штіве К. Вимушені обмеження виробництва електроенергії з відновлюваних джерел як один з варіантів забезпечення гнучкості. Аналітична записка. - [https://www.lowcarbonukraine.com/wp-content/uploads/PP4\\_09\\_2019\\_Curtailment\\_ukr.pdf](https://www.lowcarbonukraine.com/wp-content/uploads/PP4_09_2019_Curtailment_ukr.pdf)
19. [https://energypedia.info/wiki/Flexibility\\_\(Power\\_System\)](https://energypedia.info/wiki/Flexibility_(Power_System))
20. <https://drawdown.org/solutions/grid-flexibility>
21. Cochran, J., Miller, M., Zinaman, O., Milligan, M., Arent, D., Palmintier, B., O'Malley, M., Mueller, S., Lannoye, E., Tuohy, A., Kujala, B., Sommer, M., Holttinen, H., Kiviluoma, J., and Soonee, S. K. (2014). *Flexibility in 21st Century Power Systems*. 21st Century Power Partnership. URL: <https://www.nrel.gov/docs/fy14osti/61721.pdf>

22. Umar Taiwo Salman, Saifullah Shafiq, Fahad S. Al-Ismael, Muhammad Khalid. A Review of Improvements in Power System Flexibility: Implementation, Operation and Economics // *Electronics* 2022, 11(4), 581; <https://doi.org/10.3390/electronics11040581>

23. Гнучкість для енергосистеми майбутнього. Вирішення проблеми українського «зелено-вугільного» парадоксу / <https://www.wartsila.com/docs/default-source/power-plants-documents/downloads/white-papers/europe/wartsila-flexibility-to-future-proof-the-ukrainian-power-system.pdf>

24. Петрик І.М. Проблема ВДЕ – проблема не лише зелених тарифів, а довгострокове вирішення полягає не в їх урізанні / <https://www.finnishenergyhub.com/post/renewable-problem-is-not-in-feed-in-tariffs>

25. <https://ua-energy.org/uk/posts/pikery-ta-balansery-iakykh-tekhnohii-potrebuie-enerhosistema-ukrainy>

26. Лежнюк П.Д., Лисий В.М. Оцінювання впливу факторів, які впливають на енергоефективність ВДЕ під час балансування режимів електроенергетичних систем. – <https://proceedings.vntu.edu.ua/index.php/proc/article/view/17/9>

27. Кузнєцов М.П. Особливості комбінованих енергосистем з відновлюваними джерелами енергії. Київ: Інститут відновлювальної енергетики НАН України. 2022. 142 с.

28. Жуйков В.Я., Денисюк С.П. Енергетичні процеси в електричних колах з ключовими елементами. Київ: Текст, 2010. 264 с.

29. Денисюк С.П. Аналіз та оптимізація енергопроцесів у розосереджених електроенергетичних системах. Технічна електродинаміка. 2016. № 4. С. 62–64.

30. Кириленко О.В., Денисюк С.П., Буткевич О.Ф., Рибіна О.Б. Задачі забезпечення електромагнітної сумісності потужного електроенергетичного обладнання. Техн. електродинаміка. Темат. вип. «Проблеми сучасної електротехніки». 2010. С. 61–68.

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

V. Lysyi<sup>1</sup>, Ph. D. student, ORCID 0000-0003-3714-7623

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

## ANALYSIS OF ENERGY EXCHANGE PROCESSES WHEN BALANCING REGIMES ENERGY SUPPLY SYSTEMS WITH DISTRIBUTED GENERATION

*It is shown that maintaining a balance between the production and consumption of electric energy is an important condition for the stable operation of modern energy supply systems. The active increase in the share of renewable energy sources forces the use of new algorithms for balancing demand and supply, in particular, at the expense of flexibility. This implies the need to implement new technological solutions and approaches to balancing the modes of generation and consumption (the ability to quickly respond to changes in demand and supply), which, in turn, requires a detailed analysis of energy exchange processes in electric power systems.*

*It is recognized that there is a need for an in-depth analysis of the balance of energy components, and an assessment of electromagnetic compatibility in electric power systems, especially in the conditions of the growing influence of renewable energy sources on local electricity markets. Analysis of various factors influencing technological solutions and cooperation of different market parties are key components for developing effective management strategies and ensuring the stability of the electric power system.*

*The peculiarities of the analysis of energy exchange processes in local electric power systems with the determination of exchange capacities, which are integral characteristics of the influence of various factors of the non-acidity of electricity on exchange processes, are considered. It is proposed to balance the components of electric energy on the basis of exchange processes in controlled intersections of local electric power systems using the components of instantaneous power at each energetically constant state. The exchange processes in local electric power systems are analyzed with the selection of different modes of their operation, in particular, when assessing the level of electromagnetic compatibility of the elements of the local electric power systems.*

*The introduction of exchange capacities made it possible to develop indicators for assessing the level of electromagnetic compatibility of the elements of the local system. To estimate the share of consumers' contribution to the deterioration of the quality of electricity at the common connection point, an algorithm for evaluating the mutual influence of elements is proposed, with the allocation of the element's contribution to the distortion of electricity in the controlled intersection and the analysis of the magnitude of the influence of distorting factors on electromagnetic processes in the system element.*

*An optimization model for achieving the specified levels of balancing (flexibility) in local electric power systems with energy accumulators has been developed.*

**Keywords:** energy supply systems, local electric power systems, renewable energy sources, distributed generation, mode balancing, flexibility, demand management, exchange capacity.

### References

1. World Energy Transitions Outlook 2023: 1.5°C Pathway. – <https://www.irena.org/Publications/2023/Mar/World-Energy-Transitions-Outlook-2023>

2. 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.

3. Denysiuk S.P., Strzelecki R. Formation of components of an intelligent platform for managing energy systems and networks // *Energy: economics, technologies, ecology*. 2019. № 3. P. 7–22.
4. Conor E. Kelly, John A. Ging, Aman Kansal, Michael P. Walsh. Balancing Power Systems with Datacenters Using a Virtual Interconnector // *IEEE Power and Energy Technology Systems Journal* (Volume: three, Issue: 2, June 2016). P. 51–59.
5. Eddie Proffitt. Balancing the electricity system with demand side flexibility and storage. – [https://powerresponsive.com/wp-content/uploads/2021/04/NG\\_MEUC-book-2021.pdf](https://powerresponsive.com/wp-content/uploads/2021/04/NG_MEUC-book-2021.pdf)
6. <https://www.renewableenergyworld.com/solar/balancing-a-renewable-grid-what-are-the-options/#gref>
7. [https://enerhodzherela.com.ua/analitika/Балансування\\_енергетичної\\_системи](https://enerhodzherela.com.ua/analitika/Балансування_енергетичної_системи)
8. Denysiuk S.P. Peculiarities of the analysis of power system operation modes in areas with alternative sources of electricity by wind power plants. / S.P. Denysiuk, P.V. Makhlin, O.A. Shram, V.M. Slynko // *Technical electrodynamics - 2022*, No.1.P. 41–49.
9. Zharkin A.F., Denysiuk S.P., Popov V.A. Power supply systems with distributed generation sources. Kyiv: Scientific opinion.2017.230 p.
10. Kyrylenko O.V., Zhuikov V.Ya., Denysiuk S.P. 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.
11. Kaneva M., Popov Z., Stoilov D. Power Balancing in Electric Power System with Considerable Wind Power Penetration // *Efficacité énergétique – sources d’énergies renouvelables – protection de l’environnement COFRET’12*, Sozopol, Bulgarie, 14 August 2017.
12. <https://ua-energy.org/uk/posts/balansuvannia-enerhosystemy-v-poshukakh-optymalnykh-rishen>
13. [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Nov/IRENA\\_Power\\_system\\_flexibility\\_1\\_2018.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Nov/IRENA_Power_system_flexibility_1_2018.pdf)
14. Cruz I., Ilić D.D., Johansson M.T. Using flexible energy system interactions amongst industry, district heating, and the power sector to increase renewable energy penetration // *Energy Efficiency*. – 2023. – Published online: 23 June 2023, 16, Article number: 53 (2023). – 22 p.
15. Semich Imprama, Secil Varbak Neseb, Bülent Oralb. Challenges of renewable energy penetration on power system flexibility: A survey // *Oral Energy Strategy Reviews*. Volume 31, September 2020; 100539 Operational Challenges towards Deployment of Renewable Energy.
16. Denysiuk S., Derevianko D. The cost-based DSM methods in JIECs with DG sources. Paper presented at the 2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology, KhPI Week 2021. Conference Proceedings. P. 544–548. doi:10.1109/KhPIWeek53812.2021.957009
17. 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), 19-31. doi:10.21303/2461-4262.2021.001689
18. Meissner F., Stive K. Enforced restrictions on electricity production from renewable sources as one of the options for ensuring flexibility. Analytical note / [https://www.lowcarbonukraine.com/wp-content/uploads/PP4\\_09\\_2019\\_Curtailment\\_ukr.pdf](https://www.lowcarbonukraine.com/wp-content/uploads/PP4_09_2019_Curtailment_ukr.pdf)
19. [https://energypedia.info/wiki/Flexibility\\_\(Power\\_System\)](https://energypedia.info/wiki/Flexibility_(Power_System))
20. <https://drawdown.org/solutions/grid-flexibility>
21. Cochran, J., Miller, M., Zinaman, O., Milligan, M., Arent, D., Palmintier, B., O’Malley, M., Mueller, S., Lannoye, E., Tuohy, A., Kujala, B., Sommer, M., Holttinen, H., Kiviluoma, J., and Soonee, S. K. (2014). Flexibility in 21st Century Power Systems. 21st Century Power Partnership. URL: <https://www.nrel.gov/docs/fy14osti/61721.pdf>
22. Umar Taiwo Salman, Saifullah Shafiq, Fahad S. Al-Ismael, Muhammad Khalid. A Review of Improvements in Power System Flexibility: Implementation, Operation and Economics // *Electronics* 2022, 11(4), 581; <https://doi.org/10.3390/electronics11040581>
23. Flexibility for the energy system of the future. Solving the problem of the Ukrainian «green-coal» paradox / <https://www.wartsila.com/docs/default-source/power-plants-documents/downloads/white-papers/europe/wartsila-flexibility-to-future-proof-the-ukrainian-power-system.pdf>
24. Petryk I.M. The problem of RES is not only a problem of green tariffs, but the long-term solution does not lie in their reduction / <https://www.finnishenergyhub.com/post/renewable-problem-is-not-in-feed-in-tariffs>
25. <https://ua-energy.org/uk/posts/pikery-ta-balansery-iakykh-tekhnohii-potrebuie-enerhosystema-ukrainy>
26. Lezhnyuk P.D., Lysyi V.M. Assessment of the impact of factors that affect the energy efficiency of RES during the balancing of power systems. – <https://proceedings.vntu.edu.ua/index.php/proc/article/view/17/9>
27. Kuznetsov M.P. Features of combined energy systems with renewable energy sources. Kyiv: Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2022.142 p.
28. Zhuikov V.Ya., Denysiuk S.P. Energy processes in electric circuits with key elements. Kyiv: Text, 2010. 264 p.
29. Denysiuk S.P. Analysis and optimization of energy processes in distributed power systems. *Technical electrodynamics*. 2016. No. 4. P. 62–64.
30. Kyrylenko O.V., Denysiuk S.P., Butkevich O.F., Rybina O.B. Problems of ensuring electromagnetic compatibility of powerful electric power equipment. *Technical electrodynamics*. Subject. issue "Problems of modern electrical engineering". 2010. P. 61–68.

Надійшла:22.09.2023

Recieved:22.09.2023