

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

ДЕРЕВ'ЯНКО ДЕНИС ГРИГОРОВИЧ

УДК 621.311.1:620.92

ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РЕГУЛЮВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ В  
ЛОКАЛЬНИХ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ З ДЖЕРЕЛАМИ  
РОЗОСЕРЕДЖЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ

05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ – 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі електропостачання Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України.

- Науковий керівник – доктор технічних наук, професор  
**Денисюк Сергій Петрович**  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут», м. Київ,  
професор кафедри електропостачання
- Офіційні опоненти: – доктор технічних наук, старший науковий співробітник  
**Юрченко Олег Миколайович**  
Інститут електродинаміки НАН України,  
м. Київ, завідувач відділу транзисторних перетворювачів
- доктор технічних наук, доцент  
**Кулик Володимир Володимирович**  
Вінницький національний технічний університет,  
м. Вінниця, професор кафедри електричних станцій і систем

Захист відбудеться «20» грудня 2016 р. о 16<sup>30</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.20 у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут» за адресою: 03056, м. Київ-56, пр. Перемоги, 37, корп. 22, ауд. 316.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» за адресою: 03056, м. Київ-56, пр. Перемоги, 37.

Автореферат розісланий «    » листопада 2016 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради

А.М. Ковальчук

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Одним із пріоритетних напрямків сталого розвитку енергетики в Україні є побудова електроенергетичних систем на основі Smart Grid технологій, що включають в себе інтелектуальні системи вимірювання та керування енергетичними потоками з використанням пристроїв силової електроніки (СЕ). Часто сучасні системи стаціонарних об'єктів з власними ланками генерації (засновані на джерелах розосередженої генерації (РГ)) утворюють повністю локальні (автономні) електротехнічні системи (ЛЕС), об'єднані процесами генерації, перетворення, накопичення та споживання електричної енергії. Побудова таких ЛЕС актуальна для спорудження електротехнічних систем, віддалених від централізованих систем електрозабезпечення, де прокладання нових сполучних ліній з джерелом генерації або посилення існуючих є економічно недоцільним.

Особливості роботи джерел РГ на основі нетрадиційних та відновлюваних джерел енергії (НВДЕ), а саме непостійність їхнього енергетичного потенціалу та використання великої кількості різнотипних перетворювачів електроенергії, призначених для забезпечення нормованих значень параметрів електроенергії в ЛЕС, викликають низку питань, пов'язаних з оцінюванням ефективності регулювання енергетичних процесів у зазначених системах. Для аналізу процесів у виділених системах необхідна якісна оцінка, що на практиці не може бути обмежена лише оцінкою якості електричної енергії, а має також враховувати стабільність роботи джерел РГ в ЛЕС, спроможність коригування спотворень наявними коригуючими пристроями (КП) та системою керування, а також надійність ЛЕС у цілому.

У роботах Стогнія Б.С., Кириленка О.В., Буткевича О.Ф., Денисюка С.П., Жуйкова В.Я., Ямненко Ю.С., Каплуна В.В., Праховника А.В., Лежнюка П.Д., Кулика В.В., Геворкяна В.М., Дорофєєва В.В., Дьякова А.Ф., Зеленкової Л.І., Ікрамова Х.Д., Кобець Б.Б., Волкової І.О., Лабунцова В.А., Смирнова С.С., Тузлукової О.В., Ackermann T., Andersson G., Strzelecki R., Ahmed W., Ajarapu V., Baggini A., Benysek G., Bossi C., Chambers A., Cutsem V., Dolezal J., Donpi P., Katiraei F., Jiayi H., Hingorani N., Kumpulainen I., Kundur P., Purchala K., Chowdhury S., Wang S. та інших розроблені основи аналізу та теорії керування електротехнічними системами і комплексами, в тому числі з НВДЕ та пристроями СЕ, що засновані на аналізі процесів та режимів роботи цих систем. Однак ці теоретичні положення застосовувались або для класичних електротехнічних систем, або для простих електричних ланцюгів.

Тому для ЛЕС з РГ актуальним є створення методології та практичного інструментарію (методів, моделей, алгоритмів і програм) оцінки ефективності регулювання енергетичних процесів з урахуванням особливостей функціонування під'єднаних джерел РГ, процесів у класичних електротехнічних системах та простих електричних ланцюгах. Викладені вище обставини і критичний аналіз міжнародного досвіду вирішення проблеми визначили напрямки наукових досліджень, результати яких викладені в дисертаційній роботі.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Виконані у роботі дослідження відповідають напрямку «Енергетика та енергоефективність» Закону України № 2519-VI від 09.09.2010 р. «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки», комплексній програмі Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» (НТУУ «КПІ») «Енергетика сталого розвитку». Дисертаційне дослідження виконувалося згідно з планом наукових робіт кафедри електропостачання НТУУ «КПІ» у рамках науково-дослідних робіт №2668-п «Розвиток методологічних засад інтелектуалізації процесів генерації та розподілу

електроенергії в інтегрованих системах з активним споживачем», (№ ДР 0113U002489) та «Мультиагентні інтелектуальні енергетичні системи генерації, передачі та розподілу електроенергії з активним (кваліфікованим) споживачем» (№ ДР 0114U006363).

**Мета і задачі дослідження.** Метою дослідження є вдосконалення та подальший розвиток методів оцінювання енергетичних процесів в усталених режимах локальних електротехнічних систем з джерелами розосередженої генерації.

Для досягнення мети у роботі розв'язувались такі наукові задачі:

1. Дослідити особливості побудови і функціонування локальних електротехнічних систем з джерелами РГ, причини порушення стабільності та надійності їх функціонування; обґрунтувати методи оцінювання енергетичних процесів у таких системах.

2. Розширити множину показників ефективності регулювання електроенергетичних процесів у локальних електротехнічних системах з джерелами РГ та узгодити її з показниками і режимами централізованих системи електропостачання та електротехнічних систем, оцінити особливості вибору окремих показників з врахуванням типу структури локальних електротехнічних систем та алгоритмів функціонування в них різнорідних традиційних і відновлюваних джерел РГ.

3. Вдосконалити методи оцінювання енергетичних процесів у локальних електротехнічних системах з урахуванням структури різнорідних джерел та режимів спільного і роздільного їх функціонування з системою централізованого електропостачання.

4. Розробити метод оцінювання надійності локальних електротехнічних систем з джерелами РГ, який дає змогу визначити оптимальні значення розрахункових показників надійності для таких систем.

5. Розробити нормативно-методичні засади оцінювання ефективності регулювання енергетичних процесів локальних електротехнічних систем за складовими розширеної множини показників і на її основі вдосконалити методику проведення енерготехнологічних обстежень таких систем; дослідити ефективність регулювання енергетичних процесів у локальних електротехнічних системах, які містять різнорідні джерела РГ та різкозмінні навантаження.

*Об'єкт дослідження* – електроенергетичні процеси в локальних електротехнічних системах з розосередженою генерацією в усталених режимах з урахуванням керованої зміни розрахункових режимних електричних параметрів.

*Предмет дослідження* – оцінювання якості електропостачання, зокрема стабільності та надійності, ефективності регулювання енергетичних процесів у локальних електротехнічних системах з джерелами розосередженої генерації в усталених режимах.

**Методи дослідження.** Науково-методичну основу виконаних досліджень склали такі методи: системного аналізу, математичного моделювання, алгоритми та методи оцінки обмінних процесів, алгоритми оцінки додаткових втрат при передачі електроенергії в електротехнічних системах, методи та алгоритми оцінки чутливості, стабільності та надійності, методи комп'ютерного моделювання та кореляційний аналіз.

Перевірка достовірності й ефективності запропонованих методів ґрунтується на результатах експериментів та підтверджується даними, отриманими в умовах експлуатації джерел РГ при їх спільній роботі в електричних мережах України.

## **Наукова новизна одержаних результатів**

Вперше:

- здійснено комплексний аналіз структури та режимів ЛЕС з джерелами РГ, а також методів оцінювання енергетичних процесів в ustalених режимах з виділенням складових (характеристик) якості електропостачання в таких системах, котрий дає змогу виділити особливості структури ЛЕС та роботи джерел РГ при оцінюванні процесів та режимів;

- розроблено метод оцінювання надійності ЛЕС з джерелами РГ, який дає змогу визначити оптимальні значення розрахункових показників надійності для таких систем.

Вдосконалено:

- метод оцінювання енергетичних процесів у ЛЕС з урахуванням структури різнорідних джерел та режимів спільного і роздільного їх функціонування з системою централізованого електропостачання, що дає змогу враховувати несиметрію, нелінійність та нестационарність навантаження, наявність постійних складових струму та напруги;

- нормативно-методичні засади оцінювання ефективності регулювання енергетичних процесів ЛЕС за складовими розширеної множини показників і на їх основі вдосконалено методика проведення енерготехнологічних обстежень таких систем. Це дає змогу врахувати особливості зміни параметрів та режимів функціонування джерел РГ при оцінюванні в ЛЕС.

Набули подальшого розвитку:

- множина показників оцінювання якості електропостачання та ефективності регулювання енергетичних процесів у ЛЕС з джерелами РГ, узгоджена з показниками і режимами централізованих системи електропостачання та електронних систем, яка дає змогу здійснювати вибір окремих показників з урахуванням типу структури локальних електротехнічних систем та алгоритмів функціонування в них різнорідних традиційних і відновлюваних джерел РГ;

- спосіб оцінювання обмінних процесів у ЛЕС зі спотворенням форм струму та напруги (наявність вищих гармонік та несиметричних складових), що дає змогу виявити вузли генерації та/або навантаження, які вносять найбільшу величину спотворень в характеристики енергетичних процесів ustalених режимів у перетинах локальних електротехнічних систем;

- способи оцінювання якості електропостачання на основі візуалізації енергетичних процесів в електротехнічних системах, побудови енергетичних профілів, що ґрунтуються на сформованій у роботі системі критеріїв та показників, а також на особливостях побудови енергетичних профілів, які дають змогу виконувати задачу оцінювання енергетичних процесів у локальних електротехнічних системах з джерелами РГ у багатокритеріальній постановці.

**Практичне значення одержаних результатів** роботи полягає у комплексному розв'язанні задачі підвищення ефективності регулювання енергетичних процесів ЛЕС з РГ шляхом використання в цих системах додаткових КП на основі пристроїв силової електроніки, акумуляторів електроенергії та резервних джерел живлення:

- запропоновано заходи по використанню пристроїв СЕ, по підключенню до електричних мереж джерел РГ (ВЕС, СЕС, МГЕС) з використанням пристроїв акумулявання енергії та методичні засади оцінювання енергетичних процесів та режимів роботи електричних мереж з елементами РГ у МРЕМ м. Мукачєво (акт впровадження від 10.09.2013);

– запропоновано методологічні засади проведення інструментальних аудитів з метою інтелектуалізації інтегрованих систем з РГ, що ґрунтуються на запропонованих у роботі методиках оцінювання ефективності регулювання енергетичних процесів ЛЕС та вдосконаленій методиці проведення енерготехнологічних обстежень таких систем у ПАТ «Ферротрейдинг» (акт впровадження від 06.06.2013);

– на основі наведених у роботі методик проведено енерготехнологічне обстеження, в результаті якого запропоновано використовувати додаткові КП для усунення несиметрії на Слободо-Бушанській електростанції з джерелами РГ (програма досліджень від 10.12.2012);

– запропоновано заходи щодо інтелектуалізації системи електрозабезпечення наземного космічного ракетного комплексу «ЦИКЛОН-4» у ФР Бразилії шляхом впровадження елементів гнучкої передачі в системах електроживлення з розосередженою генерацією на основі пристроїв FACTS, здійснено розрахунок параметрів КП для системи електрозабезпечення, запропоновано методичні підходи та алгоритми оцінювання надійності функціонування зазначеної системи (акт впровадження від 13.09.2012);

– представлені методичні підходи та алгоритми застосовано як елементи концепції «Інтелектуальне місто», на основі котрої запропоновано заходи з реконструкції та модернізації інженерних комунікацій, впровадження сучасних систем обліку, впровадження НВДЕ в систему електропостачання міста та інші у м. Мукачево (акт впровадження від 12.04.2013).

**Особистий внесок здобувача.** Наукові положення, які є в дисертації, отримано здобувачем самостійно. У наукових працях, опублікованих у співавторстві, безпосередньо дисертанту належать: [1] – алгоритми оцінювання обмінних процесів у системах з пристроями СЕ; [2] – приклади візуалізації енергетичних характеристик для систем з регуляторами; [3] – алгоритми аналізу надійності роботи систем з розосередженою генерацією; [4] – алгоритми аналізу стабільності роботи систем з розосередженою генерацією; [5, 7, 8] – розробка алгоритму оцінки запасу стійкості для локальних систем з елементами розосередженої генерації; [9] – вдосконалені показники надійності на основі стандарту IEEE 1366; [10] – особливості оцінки якості електропостачання; [11] – алгоритми оцінювання енергетичних процесів у системах з РГ; [12, 14] – особливості застосування пристроїв СЕ; [15] – оцінка рівнів оптимальності протікання енергетичних процесів на основі декомпозиції енергетичних характеристик на складові; [16, 17] – проведення співставного аналізу ефективності роботи систем електроживлення з розосередженою генерацією та пристроями силової електроніки і накопичувачами електроенергії.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертації доповідалися на 11 міжнародних науково-технічних конференціях: «Інтелектуальні енергетичні системи – ІЕС» (Свалява, 2010; Мукачево, 2011, 2013); «Оптимальне керування електроустановками (ОКЕУ)» (Вінниця, 2011); на науково-практичній конференції «Електричні мережі: сучасні проблеми моніторингу та керування-2012» (Жденісьве, 2012); «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – REMS» (Київ, 2015 р.); «Приладобудування: стан і перспективи» (Київ, 2010); міжнародній науково-технічній конференції «Енергетика. Екологія. Людина» (Київ, 2009-2013, 2016); «Аспірантські читання пам'яті А.В. Праховника» (Київ, 2013) та на науковому семінарі «Системи енергетичного менеджменту» (Київ, 2015, 2016).

**Публікації.** Матеріали дисертаційної роботи відображено у 18 наукових працях, у тому числі 13 – у наукових фахових виданнях України, з яких три у виданнях України, які включено до міжнародних наукометричних баз (1 – Scopus і 2 – Index Copernicus), одне свідоцтво про реєстрацію авторського права на науковий твір, три тези доповідей у збірниках матеріалів конференцій.

**Структура й обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 153 найменувань і чотирьох додатків. Загальний обсяг роботи становить 171 сторінку, у тому числі 148 сторінок основного тексту, 63 рисунки, 27 таблиць.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету, наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів, а також наведено відомості про їх апробацію.

У **першому розділі** проаналізовано світові тенденції розвитку електротехнічних систем, ґрунтуючись на цьому показано доцільність широкого використання джерел РГ при створенні ЛЕС. Дано визначення ЛЕС, на основі аналізу типових узагальнених моделей ЛЕС (табл. 1) запропоновано структуру ЛЕС (рис. 1), проаналізовано особливості побудови та функціонування ЛЕС з урахуванням особливостей ланки генерації (джерел РГ), наявності та типу КП та особливостей розподілу потоків потужності в ЛЕС. Слід враховувати, що встановлення джерел РГ має досить суттєвий вплив на якість електричної енергії, а також на стабільність та надійність функціонування ЛЕС. Оптимальним по впровадженню джерел РГ в ЛЕС є побудова систем зі збалансованим електропостачанням від різнорідних джерел РГ із забезпеченням надійної та стабільної їх роботи.

Для розв'язання задач дослідження (об'єкта) у роботі використано визначення ЛЕС як сукупність генеруючого електрообладнання обмеженої потужності низької напруги, перетворювачів та споживачів електроенергії, з'єднаних між собою з урахуванням топології розподільної мережі, у яких протікають єдині електромагнітні процеси, характерні для режимів генерації, перетворення, розподілу та споживання електроенергії, котре відповідає структурі сучасних локальних систем Microgrid.

Таблиця 1

Особливості розвитку ЛЕС

№ з/п	Типи ЛЕС	Особливості ЛЕС
1	ЛЕС в умовах централізації генерації електроенергії на основі традиційних джерел змінного струму	Нарощування потужностей призвело до потреби маневрування графіків споживання. Проблеми порушення якості електроенергії. Порушення стійкості функціонування системи. Задачі забезпечення надійності системи
2	ЛЕС з РГ на основі джерел постійного струму та ЛЕС на основі традиційних джерел змінного струму	Обмежені потужності та відстань передачі електроенергії (значні втрати $RI^2$ ) для джерел постійного струму. Обмеження за типом навантаження
3	Поява у структурі ЛЕС джерел РГ на основі НВДЕ з пристроями СЕ	Побудова комплексних систем. Забезпечення дотримання якості електроенергії. Порушення стійкості функціонування системи. Забезпечення надійності системи. Поява джерел РГ на основі НВДЕ вимагає забезпечення стабільності ЛЕС

У загальному випадку математичну модель такої ЛЕС можна описати таким виразом:  $\{\Psi\} \equiv \{Q_{об}, Q_{ф}, K_{ПЯЕ}\}$ , де  $\Psi$  – множина показників якості електропостачання в

ЛЕС з джерелами РГ;  $Q_{об}$  – значення обмінних потужностей в перетинах ЛЕС;  $Q_{\Phi}$  – значення реактивної потужності за Фризе як характеристики енергетичних процесів;  $K_{ПЯЕ}$  – нормалізовані значення показників якості електроенергії (ПЯЕ); « $\equiv$ » – знак тотожної рівності. Функція  $\Psi$  має вигляд  $\Psi = f(U_k, I_k, u_j(t), i_j(t), Z(t))$ , де

$$u(t) = U_0 + \sum_{k=1}^n U_k \sin(\omega t + \psi_k^u), \quad i(t) = I_0 + \sum_{k=1}^{n,m} I_k \sin(\omega t + \psi_k^i), \quad Z(t) = R(t) + \dots + \frac{d}{dt}[L(t)\dots] + \int \left[ \frac{dt}{C(t)} \dots \right].$$

При цьому  $U_0, U_k, I_k$  – амплітудні значення напруг та струмів в перетинах ЛЕС з РГ;  $u_j(t), i_j(t)$  – миттєві значення напруг та струмів у перетинах ЛЕС,  $Z(t)$  – функція комплексного навантаження мережі (нелінійна, нестационарна, параметрична). Проте з появою джерел РГ у структурі ЛЕС виникає необхідність доповнення множини  $\Psi$  додатковими показниками, котрі дають змогу врахувати особливості роботи ДРГ.

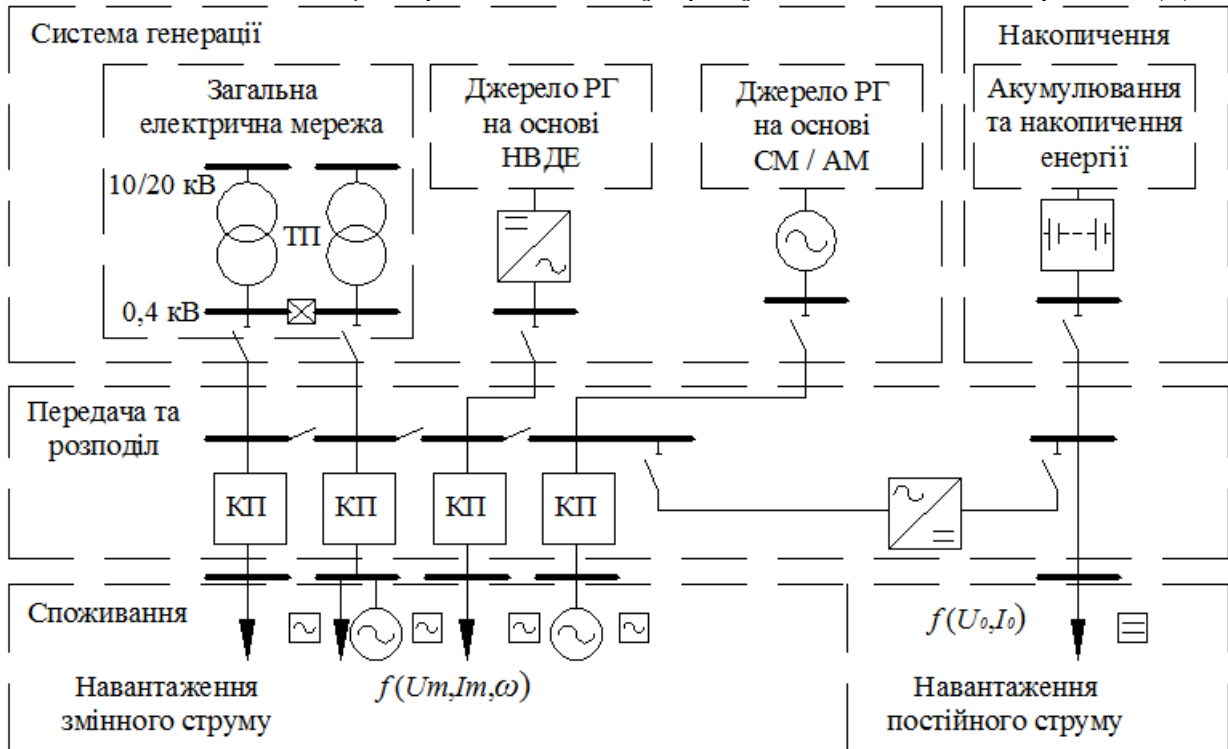


Рис. 1. Комплексна структура ЛЕС (Microgrid)

Враховуючи структуру та режими ЛЕС з РГ, визначено задачі дослідження, котрі вимагають урахування особливостей оцінювання стабільності, чутливості та надійності у зазначених системах.

У **другому розділі** запропоновано для розв'язання задачі оцінювання енергетичних процесів у ЛЕС та при виборі параметрів КП використовувати такий показник, як реактивна потужність за Фризе ( $Q_{\Phi}$ ) для оцінки неоптимальності протікання енергетичних процесів. Для забезпечення можливості урахування несинусоїдальних режимів у ЛЕС і нелінійності та нестационарності навантажень запропоновано виконувати декомпозицію реактивного струму:

$$Q_{\Phi}^2 = U^2 \cdot I_p^2 = U^2 (I_{p1}^2 + I_{p2}^2) = Q_{л.ч.}^2 + Q_{н.ч.}^2, \quad (1)$$

де  $Q_{л.ч.}$  – реактивна потужність, яку можна скомпенсувати лінійною частиною двополюсника (що складається з лінійних індуктивностей та ємностей);  $Q_{н.ч.}$  – реактивна потужність, яку можна скомпенсувати за допомогою «нелінійної частини» двополюсника,



$$Q_{\text{Л.ч.}}^2 = U^2 \sum_{k=1}^N \frac{I_{m(k)}^2 \sin^2(\varphi_k)}{2}; \quad (2)$$

$$Q_{\text{Н.ч.}}^2 = U^2 \left[ \left( I_0 - \frac{PU_0}{U^2} \right)^2 + \sum_{n,k,n \neq k} \frac{\left( I_{m(k)} \cos \varphi_n - PU_{m(k)} / U^2 \right)^2}{2} + \sum_{n,n \neq k} \frac{I_{m(n)}^2}{2} + \frac{1}{2} \sum_{k,k \neq n} \left( PU_{m(n)} / U^2 \right)^2 \right]; \quad (3)$$

де  $I_0$  – постійна складова струму;  $P$  – активна потужність навантаження;  $U_0$  – постійна складова напруги;  $I_{m(k)}$  – амплітудне значення гармоніки струму, відповідної гармоніки напруги;  $U_{m(k)}$  – амплітудне значення гармоніки напруги, відповідної гармоніки струму;  $I_{m(n)}$  – амплітудне значення гармоніки струму, для якої немає відповідної гармоніки напруги;  $U_{m(n)}$  – амплітудне значення гармоніки напруги, для якої не існує відповідна гармоніка струму;  $U$  – діюче значення напруги.

Для ЛЕС, де існують не всі ці складові, визначення  $Q_{\Phi}^2$  значно спрощується для кожної конкретної ЛЕС. На основі аналізу структури ЛЕС формалізовано та систематизовано аналітичний опис складових енергетичних процесів у ЛЕС, котрі дають змогу проводити експрес-оцінку у зазначених системах, скоротивши час розрахунків (оскільки відпадає необхідність врахування усіх складових показника  $Q_{\Phi}$ ) зі збереженням адекватності результатів.

Для обґрунтування оптимальності використання показника  $Q_{\Phi}$  розраховано його залежності у фрагменті ЛЕС постійного струму (рис. 1). Результати розрахунку представлені на рис. 2а. Реактивна потужність з лінійною зміною струму  $I_1$  (від 2 до 20 А) змінюється нелінійно (причому її значення коливається в межах 30 %). Існує точка оптимальності, при якій значення реактивної потужності буде оптимальним. Хоча вважається, що в мережах постійного струму реактивної потужності не має бути. Її присутність зумовлена нелінійністю перетворюючих елементів, які є джерелами завад – гармонічних складових.

Аналізуючи отримані залежності для фрагменту ЛЕС змінного струму (рис.1), наведені на рис. 2б, можна бачити, що реактивна потужність з лінійною зміною струму  $I_0$  змінюється нелінійно (нелінійний характер зміни  $Q_{\Phi}$  обумовлено нелінійністю зміни складової  $Q_{\text{Н.ч.}}$ , котра при зростанні струму  $I_0$  зростає майже втричі).

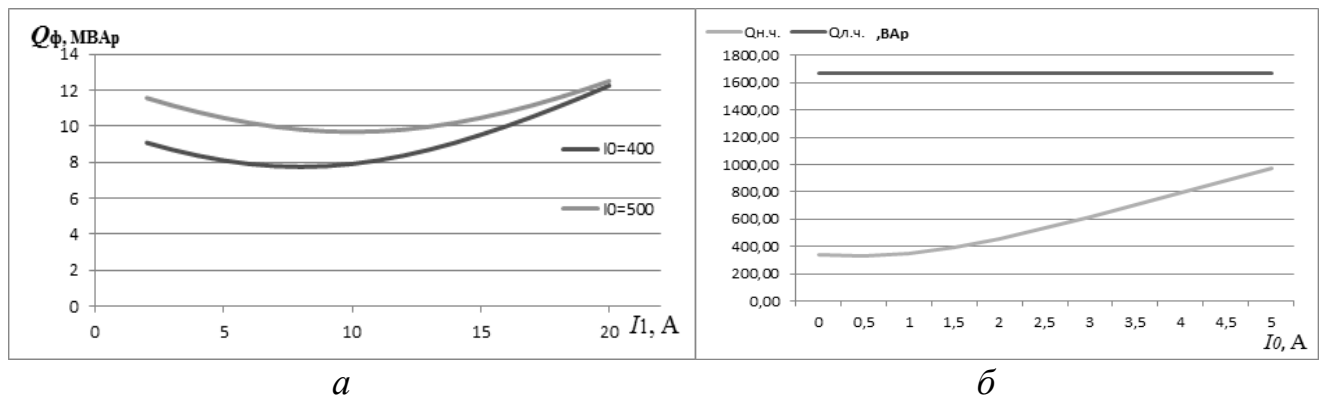


Рис. 2. Зміни величини  $Q_{\Phi}$  при зміні складових струмів у ЛЕС: 2а – залежність  $Q_{\Phi}$  від зміни першої гармоніки струму, 2б – залежність  $Q_{\text{Н.ч.}}$  та  $Q_{\text{Л.ч.}}$  від зміни постійної складової струму

Лінійна частина ( $Q_{л.ч.}$ ) при зміні постійної складової струму не змінюється. Це також свідчить, що даний підхід є оптимальним з точки зору оцінювання енергетичних процесів у ЛЕС.

Показник  $Q_{\Phi}$  є також оптимальним в оцінюванні енергетичних процесів у

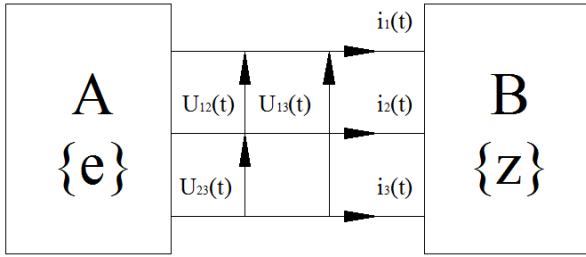


Рис. 3 – Структурна схема трифазної ЛЕС  $\{e\}$ - $\{z\}$

трифазних ЛЕС завдяки можливості врахування величини несиметрії. Для структурної схеми, зображеної на рис. 3, що представлена з'єднанням  $\{e\}$ - $\{z\}$ , де  $e$  – трифазний генератор,  $z$  – нелінійне, нестационарне несиметричне навантаження, було отримано аналітичні вирази для визначення повної потужності. Ці вирази доцільно використовувати в ЛЕС в залежності

від типу несиметрії (струмів та напруг):

$$S_m^2 = (U_A + U_B + U_C)^2 (I_A + I_B + I_C)^2 = P^2 + Q_{\Phi}^2 + Q_{\Phi H}^2; \quad (4)$$

$$P^2 = (U_A + U_B + U_C)^2 (I_{Aa} + I_{Ba} + I_{Ca})^2; \quad Q_{\Phi}^2 = (U_A + U_B + U_C)^2 (I_{Ap} + I_{Bp} + I_{Cp})^2; \quad (5)$$

$$Q_{\Phi H}^2 = [(I_{Aa} - I_{Ba})^2 + (I_{Ba} - I_{Ca})^2 + (I_{Ca} - I_{Aa})^2] [(U_A - U_B)^2 + (U_B - U_C)^2 + (U_C - U_A)^2]. \quad (6)$$

Внаслідок наявності несиметричних режимів трифазного генератора, обумовлених особливостями його функціонування в ЛЕС, з РГ слід виділяти спотворені та неспотворені значення напруг,  $U_c$  та  $U_{nc}$  відповідно, для яких слід визначати значення спотвореної та неспотвореної величин  $Q_{\Phi C}$  та  $Q_{\Phi HC}$ . У такому випадку для оцінювання складових повної потужності доцільно користуватися наступним виразом:

$$Q_{\Phi H}^2 = \sum_{i=1}^n Q_{\Phi C i}^2 + Q_{\Phi HC}^2. \quad (7)$$

де  $n$  – число фаз. Відповідно величини  $Q_{\Phi C}^2$  та  $Q_{\Phi HC}^2$  для кожної з фаз можна визначити таким чином:

$$Q_{\Phi C 1}^2 = (I_H)^2 (U_{AB})^2 = [(I_{Aa} - I_{Ba})^2 + (I_{Ba} - I_{Ca})^2 + (I_{Ca} - I_{Aa})^2] (U_{AB})^2;$$

$$Q_{\Phi C 2}^2 = (I_H)^2 (U_{BC})^2 = [(I_{Aa} - I_{Ba})^2 + (I_{Ba} - I_{Ca})^2 + (I_{Ca} - I_{Aa})^2] (U_{BC})^2;$$

$$Q_{\Phi C 3}^2 = (I_H)^2 (U_{CA})^2 = [(I_{Aa} - I_{Ba})^2 + (I_{Ba} - I_{Ca})^2 + (I_{Ca} - I_{Aa})^2] (U_{CA})^2;$$

де  $I_H$  – сумарний струм несиметрії.

$$Q_{\Phi HC}^2 = (I_H)^2 k (U_{HC})^2 = [(I_{Aa} - I_{Ba})^2 + (I_{Ba} - I_{Ca})^2 + (I_{Ca} - I_{Aa})^2] k (U_{HC})^2$$

де  $k$  – коефіцієнт, котрий відображає кількість незбурених напруг (1 чи 2). У випадку, коли кількість незбурених напруг,  $k = 2$ , розрахунок величини  $Q_{\Phi H}$  спрощується у порівнянні з виразом (6).

На основі виразів (1) ... (3) для розрахунку величини  $Q_{\Phi}$  та враховуючи складову несиметрії за виразом (7) для фрагменту ЛЕС, що зображена на рис. 1, отримано залежності величини повної потужності для системи  $\{\Gamma\}$  –  $\{H\}$ , де  $\Gamma$  – НВДЕ з несиметричним навантаженням при параметрах генератора  $k = 2$ , до зміни параметрів навантажень ( $L, LC, C, R$  зі зміною діапазону  $\varphi_1, \varphi_3 \in [0; \pi]$ ) та  $K_{\Pi}$  від 0,15 до 0,25 (рис. 4 –  $S = (P^2 + Q_{\Phi}^2 + Q_{\Phi H}^2)^{1/2}$ ), та проведено порівняння з розрахунковими значеннями повної потужності без урахування складової  $Q_{\Phi H}$ :  $S_1 = (P^2 + Q_{\Phi}^2)^{1/2}$ .

При відсутності несиметрії в системі має виконуватись співвідношення  $S \equiv S_1$ , де « $\equiv$ » – знак тотожної рівності. Залежно від режимів роботи трифазного генератора та навантаження в ЛЕС  $S \neq S_1$  характеризує відмінність розрахункових значень повної потужності обумовлених несиметричними режимами  $\Delta S_H$ . Відмінності форм  $S$  та  $S_1$

дають змогу відслідкувати наявність несиметрії в системі. У числовому вираженні їхня різниця для цього прикладу сягає до 2%. Такий підхід дав змогу більш точно оцінити енергетичні процеси в трифазних ЛЕС.

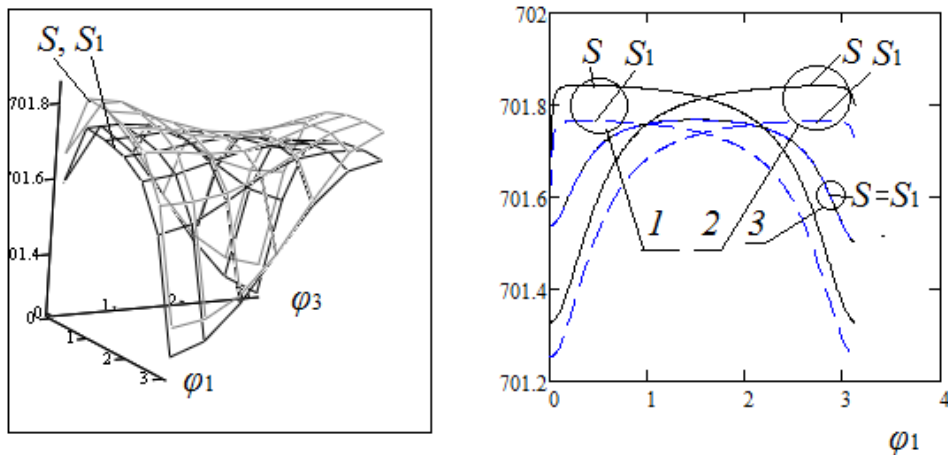


Рис. 4. Зображення та перерізи поверхонь, котрі описують зміну повної потужності для трифазної ЛЕС з урахуванням складової  $Q_{\text{фн}}(S)$  та без її урахування ( $S_1$ )

Для оцінки стабільності в ЛЕС проведено визначення нев'язок між цільовими параметрами режимів ЛЕС та реальними параметрами, враховуючи наявність коригуючих пристроїв (КП) у структурі виділених систем. Представимо у спрощеному вигляді ЛЕС як систему  $\{\Gamma\}$ - $\{H\}$ . Нехай струми компенсації КП, що складається з активної (АЧ) та пасивної (ПЧ) частин,  $i_{p,АЧ1}(t)$  та  $i_{p,АЧ2}(t)$  характеризуються спектрами гармонік  $S^{(1)}$  та  $S^{(2)}$ . У ідеальному випадку має виконуватись співвідношення  $S^{(1)} \equiv S^{(2)}$ , де « $\equiv$ » – знак тотожної рівності. Залежно від схемотехнічної реалізації КП нерівність  $S^{(1)} \neq S^{(2)}$  характеризує відмінність спектрів як за амплітудами  $\{\Delta S_A\}$ , так і за початковими фазами  $\{\Delta S_\psi\}$ . У першому наближенні при введенні норм  $S_{H1} \equiv \|S^{(1)}\|, S_{H2} \equiv \|S^{(2)}\|$  маємо рівності з нев'язками  $\Delta_1, \Delta_2$ :  $S_{H1} - S_{H2} = \Delta_1; S_{H2} - S_{H1} = \Delta_2$ , де  $\Delta_1 > 0, \Delta_2 > 0$ . Для діючих значень струмів  $I_1$  та  $I_2$  (відповідно миттєвих струмів  $i_{p,АЧ1}(t)$  та  $i_{p,АЧ2}(t)$ ) можемо записати:  $I_1^2 - I_2^2 = \Delta_{1,I}^2$ ;  $I_2^2 - I_1^2 = \Delta_{2,I}^2$ , де  $\Delta_{1,I} > 0; \Delta_{2,I} > 0$ . Аналіз наведених виразів підтверджує, що відмінність спектрів зумовлює появу «перекомпенсованої» чи «нескомпенсованої» складової струму. Позначимо цей додатковий струм як  $\Delta i_{ПЧ}(t) = i_{p,ПЧ2}(t)$ . Його компенсація має забезпечуватись АЧ. Таким чином, струм компенсації реальної ПЧ КП буде мати такий вигляд:  $i_{p,ПЧ}(t) = i_{p,ПЧ1}(t) + i_{p,ПЧ2}(t)$ , де  $i_{p,ПЧ1}(t)$  – струм, який повністю скомпенсує ПЧ, а  $i_{p,ПЧ2}(t)$  представляє собою струм, котрий ПЧ не в змозі скомпенсувати, або струм, що генерується при компенсації ПЧ струму  $i_{p,ПЧ1}(t)$ . Тоді АЧ компенсуватиме окрім струму  $i_{p,АЧ}(t)$ , який вона має скомпенсувати в ідеальному випадку, додатковий струм  $i_{p,ПЧ2}(t)$  – струм, який генерує ПЧ. Для оцінки меж стабільності роботи ЛЕС з КП при різних конфігураціях (схемотехнічній реалізації) ПЧ у роботі запропоновано та використано показник  $K_{\text{ст}}$  та його залежності від параметрів навантажень для визначення допустимих режимів функціонування ЛЕС. Цей показник є залежністю реального параметра (реактивного струму) КП від параметра компенсації (струму компенсації) ЛЕС.

У третьому розділі виділено узагальнені режими функціонування ЛЕС з КП з урахуванням зміни параметрів навантажень (зміна характеру навантажень від індуктивного до ємнісного), зображені на рис. 5 (як КП в узагальненій схемі {Г} – {КП} – {Н} досліджувалося чотири типи схем гібридних фільтрів з різними пасивними частинами,  $C_1$  (компенсація за 1-ю гармонікою),  $C_{opt}$  (компенсація за 1-ю та вищими гармоніками),  $LC$ ,  $C-LC$ ).

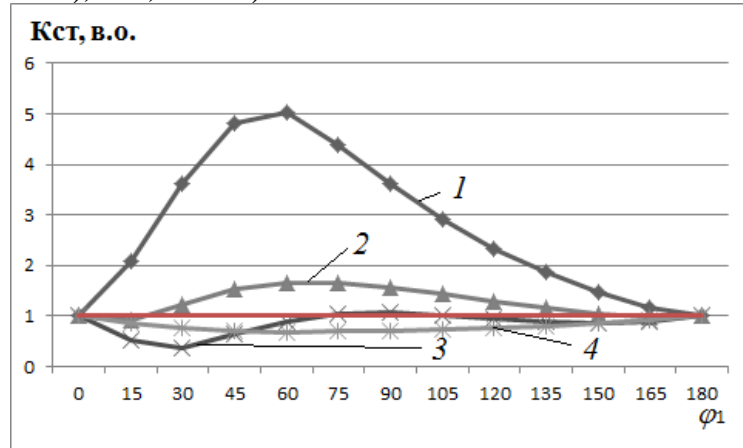


Рис. 5. Режим 1 – нестабільний; 2, 3 – відн. стабільності; 4 – стабільний

Для розширення діапазону регулювання параметрів енергетичних процесів, введено додаткові характеристики енергетичних процесів для фрагмента ЛЕС з КП, на основі залежностей величин  $P$ ,  $Q_\Phi$ ,  $dP/d\alpha$ ,  $dQ_\Phi/d\alpha$  та  $dP/dQ_\Phi(\alpha)$  від зміни параметра кута регулювання вентиля КП ( $\alpha$ ), що знаходиться у структурі ЛЕС (рис. 1), представленій з'єднанням {Г}-{Н} з КП представленим регулятором струму з  $R$ -навантаженням (при діапазоні зміни кута  $\alpha$  від 0 до  $\pi/2$ ).

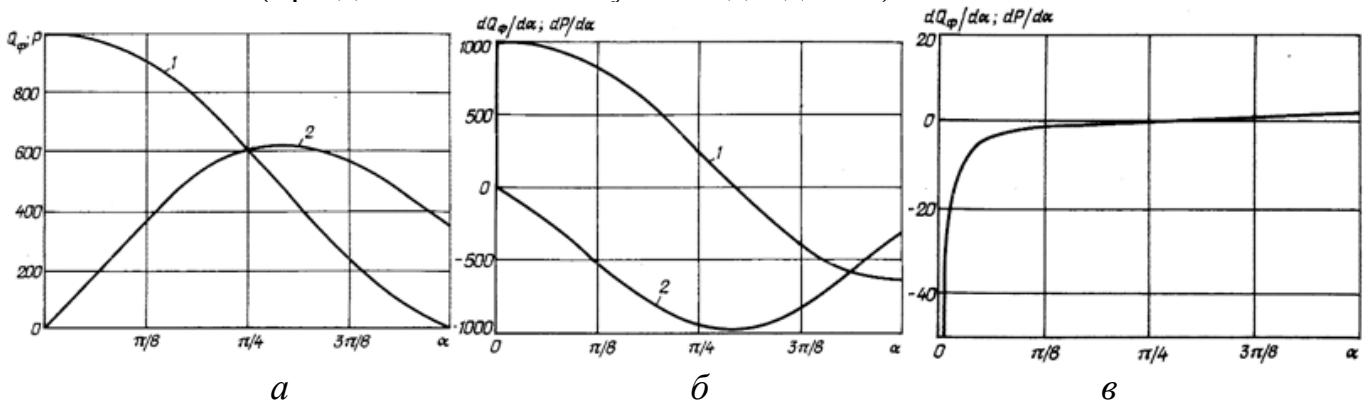


Рис. 6. Характеристики енергетичних процесів ЛЕС з КП

Побудувавши залежності  $P$ ,  $Q_\Phi$  (криві 1 та 2 на рис. 6а),  $dP/d\alpha$ ,  $dQ_\Phi/d\alpha$  (криві 1 та 2 на рис. 6б) чи  $dP/dQ_\Phi(\alpha)$  (див. рис. 6в) для моделі фрагмента ЛЕС (згідно з рис. 1), отримаємо екстремуми величин  $P$  та  $Q_\Phi$  відносно зміни  $\alpha$  як додатковий інструмент оцінки енергетичних процесів у ЛЕС, котрий дає змогу враховувати особливості роботи різнотипних КП у структурі ЛЕС.

Для виявлення вузлів у ЛЕС з джерелами РГ, до яких підключено джерела генерації та/або навантаження, що вносять найбільшу величину спотворень в енергетичні процеси в усталених режимах, запропоновано проводити оцінку інтенсивності протікання обмінних процесів у перерізах ЛЕС з розділенням за першою (індекс «1»), однією  $j$ -ю вищою (індекс « $j$ »), підмножиною {Н} вищих (індекс «Н») та всіма вищими (індекс « $\Sigma$ ») гармоніками згідно з виразом (8).

$$Q_{об}^{(k)} = \frac{1}{T} \int_0^{t^+} u(t) I_{m(k)} \sin(\omega t - \psi_k^i) dt \quad (8)$$

Показані на рис. 7 залежності відображають зміни величини  $Q_{об}$  у фрагменті ЛЕС: {Г} – {2Н} (див. рис. 1), в котрій одне з навантажень виступало як джерело завад (вищих гармонічних складових), при різних значеннях коефіцієнта  $K_{\Pi}$  за струмом ( $K_{\Pi} = I_{m\infty}/I_{m1}$ ) та напругою і підтверджують адекватність запропонованих моделей, що використовуються для визначення винуватців порушення стабільності в ЛЕС.

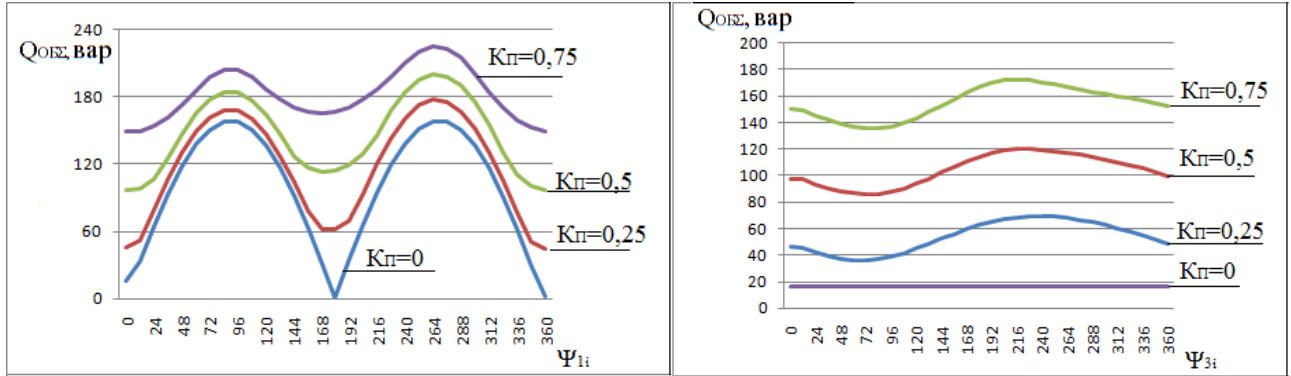


Рис. 7. Обмінні процеси в ЛЕС

Аналізуючи наведені залежності  $Q_{об}$  від зміни параметрів навантаження зроблено висновок, що при суто активному навантаженні та відсутності вищих гармонічних складових ( $K_{\Pi} = 0$ ) величина  $Q_{об} = 0$ , при зміні навантаження та появи вищих гармонік ( $K_{\Pi}$ : 0,25; 0,5; 0,75) ця величина зростає (на 15% з пропорційним зростанням  $K_{\Pi}$ ), при чому свого піку вона сягає при активно-емнісному характері навантаження (початкова фаза струму рівна  $2\pi/3$ ). На основі наведених залежностей величини  $Q_{об}$  виокремлено режими стабільної роботи ЛЕС (синусоїдний, квазісинусоїдний, нелінійний, граничний, неприпустимий).

З метою оцінювання експлуатаційної надійності в ЛЕС з урахуванням особливостей усталених режимів запропоновано умовно ділити всі джерела живлення в ЛЕС на три типи: 1) джерела централізованого електропостачання; 2) джерела РГ безперервного електрозабезпечення; 3) джерела РГ, вихідні параметри яких залежать від погодних умов і не регульовані людиною.

Запропоновано умовно ділили перерви в електропостачанні споживачів на аварійні та спричинені особливостями роботи генераторів (рис 8). При цьому, необхідно враховувати, що для різнотипних джерел РГ в ЛЕС графіки перерв в електропостачанні споживачів будуть різними, як показано на рис. 8.

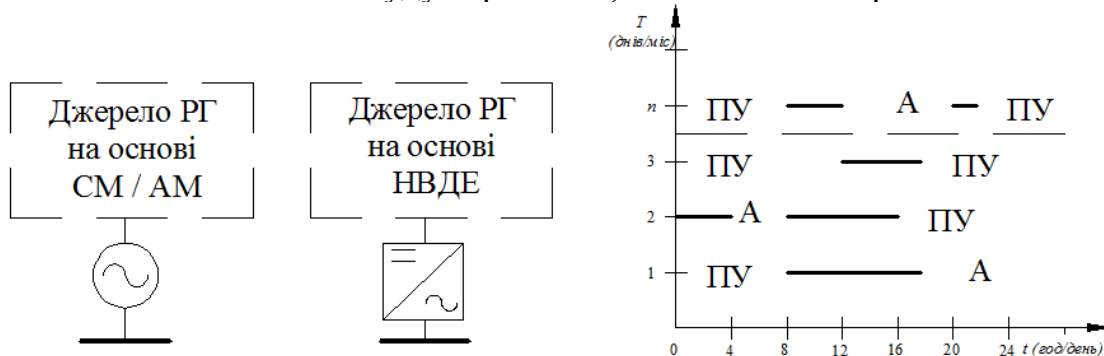


Рис. 8. Перерви в електропостачанні споживачів для двох різнотипних джерел РГ (А – аварійні, ПУ – спричинені погодними умовами,  $n$  – кількість днів у місяці, СМ/АМ – синхронна/асинхронна машина)

Слід зазначити, що спосіб оцінювання надійності в ЛЕС має бути універсальним по відношенню до показників надійності описаних в стандарті IEEE 1366, що застосовуються в Україні. Для структури ЛЕС, показаної на рис. 1, в умовах нормування показників надійності  $R$  (reliability index) запропоновано нормалізовані показники для оцінки експлуатаційної надійності. Позначивши нормалізований показник надійності для ЛЕС –  $NRI_{LES}$  (*normalized reliability index for local electrotechnical system*), визначимо його з наступного співвідношення:  $NRI_{LES} = R/R_T$ , де –  $R$  та  $R_T$  відповідно реальний та цільовий (*targeted*) показники надійності. Це дає змогу доволі просто оцінити, чи знаходиться той або інший показник експлуатаційної надійності в заданих межах, що задовольняють умовам якісного електропостачання в ЛЕС.

Для визначення оптимально досяжного значення цього показника запропоновано та використано метод нормалізованої декомпозиції показників надійності на складові, що враховує особливості режимів роботи джерел РГ в ЛЕС. Даний метод можна описати наступною послідовністю кроків:

1. Розрахунок показника  $R$  згідно зі стандартом IEEE 1366 з урахуванням

величини розрахункового періоду:  $R_{розр} = \sum_{i=1}^n R_i$ ;

2. Обчислення нормалізованого показника  $NRI_{LES}$ ;

3. Декомпозиція  $R$  на складові  $R_{дж}$  з визначенням частки кожної складової у загальній величині  $R$ :  $R_{дж} = \sum_{i=1}^n R_i$ ,  $\omega_i = R_{дж\_i} / R$ ;

4. Декомпозиція отриманих показників  $R$  з причини виникнення перерв в електропостачанні:  $R_{розр} = \sum_{i=1}^n R_i = \sum_{i=1}^n (R_{iOO} + R_{iWO})$ ;

5. Обчислення частки розрахованих у пункті 4 цього алгоритму показників від загальної величини показника  $R$ :  $\omega_{iOO}^* = R_{iOO} / R_i$ ,  $\omega_{iWO}^* = R_{iWO} / R_i$ ;

6. Визначення найкращого досяжного значення  $NRI_{LES}$  проводиться з урахуванням перерв в електропостачанні, спричинених лише аварійними ситуаціями:

$$NRI_{LESb} = \left[ \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot \omega_{iOO}^* \cdot R \right] / R_T = \left[ \sum_{i=1}^n (R_{iOO}) \right] / R_T;$$

7. Визначення оптимально досяжного значення  $NRI_{LES}$  проводиться з урахуванням економічних показників проектів по підвищенню експлуатаційної надійності ЛЕС за такою формулою:

$$NRI_{LESopt} = \frac{\sum_{i=1}^n (R_{iOO} + R_{iWO} \cdot C_{iopt})}{R_T}, \quad C_{iopt} = \begin{cases} 1, NPV < 0, IRR < MARR \\ 0, NPV > 0, IRR > MARR, R_i \neq R_{iNO} \end{cases},$$

де  $R_{iWO}$  та  $R_{iNO}$  – показники надійності  $R_i$ , причиною перерви в електропостачанні яких були відповідно зміни погодних параметрів (величини сонячної інсоляції для РГ та ін.), *Weather Outage (WO)* та аварійна ситуація, *Ordinary Outage (OO)*;  $C_{iopt}$  – коефіцієнт оптимальності;  $NPV$  – чиста приведена вартість проекту з підвищення надійності;  $IRR$  – внутрішня норма прибутковості;  $MARR$  – показник, що встановлює норму прибутковості проектів по підвищенню надійності функціонування ЛЕС.

Підсумовуючи викладене, можна зробити висновок, що при оцінці стабільності та надійності у ЛЕС необхідно враховувати множинність показників та критеріїв, притаманних як енергетичним, так і електротехнічним системам та комплексам (табл. 3).

Показники якості електропостачання в ЛЕС

Показники якості електропостачання	Локальні електротехнічні системи	
	Стабільність	Надійність
Експлуатаційні показники	$K_{ст}, \{K_{ПЯЕ}\}$ (нормалізовані значення ПЯЕ згідно зі стандартом)	$NRI_{ЛЕС}$ (на основі показників стандарту IEEE 1366)
Режимні показники	$S_{\beta}^{\alpha} = S_{\beta}^{Q\Phi} (dP/d\alpha, dQ_{\Phi}/d\alpha \text{ та } dP/dQ_{\Phi}(\alpha))$	$LOLE, EIR, EFOR$ (показники режимної надійності)
Обмінні процеси	$Q_{об}$ (для визначення допустимих режимів ЛЕС)	$Q_{об}$ (для визначення винуватців порушення надійності)
Оцінка додаткових втрат	$Q_{\Phi}, Q_{\Phi n}$ (для оцінювання складових втрат енергетичних процесів)	

Особливістю цієї множини показників є аналіз чутливості характеристик режимів ЛЕС  $S_{\beta}^{\alpha}$  до зміни їхніх параметрів ( $\beta$ ). Тобто оцінка стабільності та надійності у ЛЕС зводиться до побудови моделі ЛЕС на основі наведених критеріїв (табл. 3). У роботі запропоновано підхід, що включає візуалізацію показників ЛЕС (рис. 9), який дає змогу вирішувати задачу оцінювання ефективності регулювання енергетичних процесів у ЛЕС у багатокритеріальній постановці на основі побудови профілів ЛЕС.

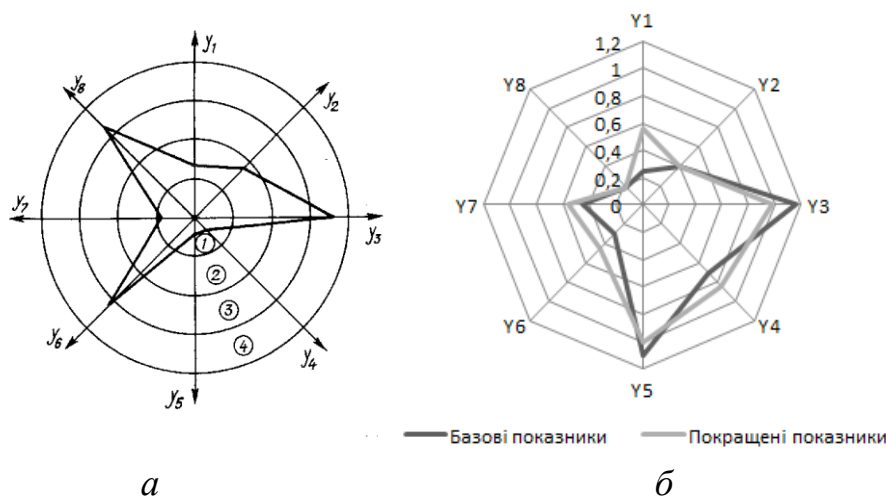


Рис. 9. Комплексне представлення показників якості електропостачання в ЛЕС

На рис. 9б зображено два енергетичні профілі ЛЕС ( $Pf_1, Pf_2$ ), котрі відображають два різних стани ЛЕС. Шкали показників градовані у відносних одиницях. На наведених діаграмах (рис. 9) встановимо, що область (1) (на діаграмі – 0-0,3 відносних одиниць (в.о.)) відповідає оцінці «Дуже добре»; область (2) (0,3 - 0,6 в.о.) – оцінці «Добре»; область (3) (0,6 – 1,0 в.о.) – оцінці «Нормально»; область (4) (1,0 – 1,2 в.о.) – оцінці «Погано».

$Pf_2$  (табл. 4), котрий містить «покращені» показники, хоча і має в окремих випадках значення гірші, ніж  $Pf_1$ , проте вся сукупність показників  $Pf_2$  не виходить за межі області «Нормально», на відміну від фігури 1. Це свідчить про більш якісний стан процесів в описаній ЛЕС.

Розширена множина показників та запропонований спосіб візуалізації дають змогу враховувати структуру та усталені режими роботи ЛЕС при оцінці їх стабільності та надійності.

Розрахункові значення профіля ЛЕС

Нормалізоване значення	<i>SAIDI</i>	<i>SAIFI</i>	<i>MAIFI</i>	<i>U</i>	<i>f</i>	<i>ENS</i>	<i>ASIDI</i>	<i>THD</i>
Базова фігура	0,25	0,4	1,16	0,7	1,001	0,3	0,45	0,18
Нова фігура	0,56	0,4	0,98	0,85	1,0008	0,45	0,56	0,18

Принциповою особливістю запропонованого методу нормалізованої декомпозиції показників надійності є простота розрахунків та можливість визначення «слабких» місць в електричних мережах ЛЕС, що потребують особливої уваги при підвищенні надійності функціонування ЛЕС.

У **четвертому розділі** запропоновано методику «Оцінювання ефективності регулювання енергетичних процесів у ЛЕС з джерелами РГ», запропоновану вперше та методику «Проведення енергетичних обстежень», вдосконалену та апробовану в дисертаційній роботі. Перша методика базується на алгоритмі обчислення показників та критеріїв ефективності регулювання енергетичних процесів у ЛЕС з джерелами РГ, та на побудові візуалізованого профіля ЛЕС для комплексної оцінки її станів. Даний алгоритм має таку послідовність: 1. обчислення показників та критеріїв ефективності регулювання енергетичних процесів у ЛЕС з джерелами РГ, запропонованих у табл. 3.; 2. нормалізація значень розрахункових показників та критеріїв згідно з їх нормованими значеннями; 3. побудова візуалізованого профілю ЛЕС з джерелами РГ; 4. оцінювання ефективності регулювання енергетичних процесів у ЛЕС з джерелами РГ; 5. декомпозиція показників та критеріїв на складові для подальшого оцінювання можливості покращення їхніх розрахованих значень; 6. визначення кінцевих оптимальних досяжних значень показників та критеріїв ефективності регулювання енергетичних процесів у ЛЕС з джерелами РГ на основі оцінювання економічної доцільності впровадження заходів щодо покращення їхніх розрахункових значень; 7. побудова оптимізованого візуалізованого профілю ЛЕС з джерелами РГ.

Вдосконалено й апробовано методику «Проведення енергетичних обстежень», що базується на стандартному алгоритмі, який забезпечить як найбільш ефективну роботу аудитора, так і можливість ефективного залучення інших аудиторів на визначених етапах роботи. Схема вдосконаленої методики представлена на рис. 10.

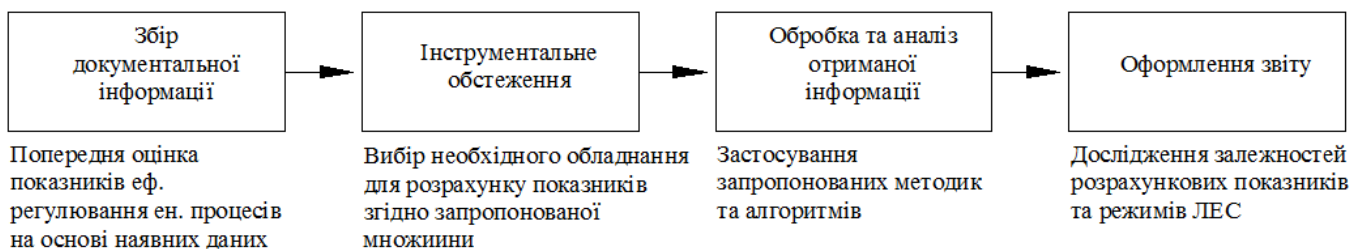


Рис. 10 – Схема вдосконаленої методики проведення енергетичного обстеження з метою подальшої оцінки стабільності та надійності в ЛЕС

Запропонована методика була апробована та впроваджена в ПАТ «Ферротрейдинг» (акт впровадження від 06.06.2013) для проведення енерготехнологічних обстежень та аналізу режимів і технологічних процесів та при проведенні енергетичного обстеження сонячної електростанції, що працювала паралельно з МГЕС у селі Слобода-Бушанська Ямпільського району. Генеруюча потужність складається з 7060 сонячних панелей потужністю 250 Вт та двох асинхронних машин потужністю 140 кВт кожна. Сумарна потужність сонячної



електростанції складає 1,8 МВт, МГЕС – 240 кВт. Вимірювання параметрів ustalених режимів здійснювалось з 16:00 до 10:00 наступного дня. Результати аналізу показано на рис. 11.

Провівши розрахунок  $Q_{\phi}$  з її декомпозицією на лінійну та нелінійну складові, зроблено висновок, що нелінійна складова реактивної потужності за Фризе змінюється безвідносно до змін сонячної інсоляції впродовж світлового дня і також присутня вночі. Отже, на цю складову мають значний вплив і два асинхронні двигуни (АД), що працюють у генераторному режимі на малій гідроелектростанції (МГЕС).

Оцінивши складові реактивної потужності за Фризе для трифазної системи на основі виразів (1)...(3), а також провівши кореляційний аналіз величини  $Q_{\phi}$  з параметрами енергетичних процесів, зроблено висновок, що значний вплив на  $Q_{\phi}$  мають вищі гармонічні складові, котрі генеруються як СЕС, так і МГЕС та зміна параметрів навантаження. Проте найбільш на величину реактивної потужності за Фризе у трифазній системі впливає складова несиметрії (рис. 11), розрахованої з виразу (7). За окремі періоди часу фактичне значення реактивної потужності у даній системі було у 1,4 разу більше від величини  $Q_{\phi}$  без урахування несиметрії. Отримані залежності підтверджують адекватність запропонованих методик, системи показників та критеріїв.

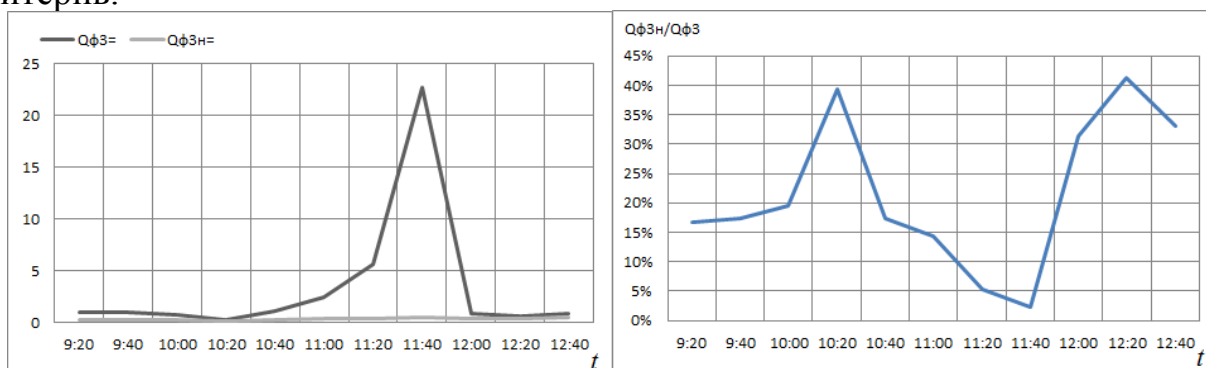


Рис. 11 – Зміна несиметричної складової  $Q_{\phi 3n}$  та повної  $Q_{\phi 3}$  в часі для трифазної системи та співвідношення величин  $Q_{\phi 3n}$  та  $Q_{\phi 3}$  в часі

Результати досліджень було передано та впроваджено в ДП ЦПІ МО України та використано при проектуванні електричних мереж та виборі КП у структурі електрозабезпечення КРК «ЦИКЛОН-4». При оцінюванні енергетичних процесів у фрагментах електричних мереж КРК «ЦИКЛОН-4» у ФР Бразилії (акт впровадження від 13.09.2012) було побудовано моделі фрагментів означених мереж та проаналізовано залежності величин обмінних потужностей від зміни параметрів навантажень (рис. 12) у перетинах зазначених мереж представлених еквівалентними характеристиками  $\{\Gamma\}$ - $\{2H\}$ , розрахованими з виразу (8) при відсутності та наявності вищих гармонік струму та напруги і значеннями  $K_{\Pi}$ : 0,5; 0,15; 0,25.

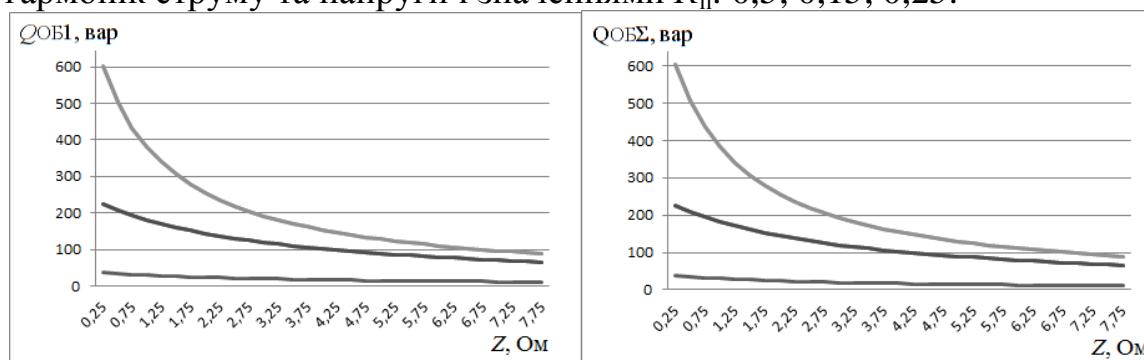


Рис. 12 – Функціональні залежності  $a - Q_{OB}^1(Z_1)$ ,  $b - Q_{OB}^{\Sigma}(Z_1)$

Запропоновані методичні засади були використані як елементи концепції «Інтелектуальне місто», запропонованої у співавторстві та впровадженої в м. Мукачево й у навчальному процесі кафедри електропостачання НТУУ «КПІ»; зокрема, методичне забезпечення представлено у навчальному посібнику «Основи електротехніки та електропостачання».

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано актуальну задачу оцінювання режимів роботи ЛЕС із джерелами РГ та визначення винуватця порушення стабільності та надійності функціонування зазначених систем, що передбачає розробку нових методів, практичних рекомендацій та алгоритмів, реалізація яких дає змогу знайти найбільш ефективні рішення у процесі реформування та розвитку галузі. Основні результати дисертаційної роботи:

1. Здійснено комплексний аналіз структури та режимів локальних електротехнічних систем з джерелами розосередженої генерації, який показав, що існуючі методи не дають змоги враховувати всі усталені режими ЛЕС з джерелами РГ та структуру генерації у виділених системах й існує необхідність розробки додаткових показників та критеріїв для оцінювання режимів у ЛЕС з РГ.

2. Запропонований метод оцінювання надійності локальних електротехнічних систем з джерелами РГ дає змогу визначити оптимальні значення розрахункових показників надійності для таких систем (при значенні  $NPV > 0$  для більшості коефіцієнтів  $C_{opt}$  отримаємо значення  $NRI_{LES} < 1$ ) та є універсальним по відношенню до всіх показників, наведених у стандарті IEEE 1366.

3. Вдосконалений метод оцінювання енергетичних процесів дає змогу враховувати особливості структури ЛЕС та параметрів різномірних джерел РГ при спільному і роздільному їх функціонуванні з системою централізованого електропостачання, та скоротити час розрахунків на 18% при оцінюванні енергетичних процесів у виділених системах.

4. Вдосконалена методика проведення енерготехнологічних обстежень ЛЕС з джерелами РГ дає змогу проводити якісну оцінку енергетичних процесів таких систем з урахуванням параметрів процесів та режимів функціонування означених систем, її використання у МРЕМ м. Мукачево визначило потенціал енергоефективності на рівні 20%.

5. Запропонована у роботі множина показників оцінювання якості електропостачання та ефективності регулювання енергетичних процесів, узгоджена з показниками і режимами централізованих систем електропостачання та електронних систем, дає змогу урахувати типи структури локальних електротехнічних систем та алгоритми функціонування в них різномірних традиційних і відновлюваних джерел РГ (при її апробації значення реактивної потужності у 1,38 рази перевищувало розраховане класичним методом за рахунок урахування несиметричних складових).

6. Наведений у роботі спосіб оцінювання обмінних процесів у локальних електротехнічних системах дає змогу виявити вузли генерації та/або навантаження, які вносять найбільшу величину спотворень у характеристики енергетичних процесів усталених режимів у перетинах локальних електротехнічних систем та визначити допустимі режими функціонування виділених систем на основі оцінки інтенсивності протікання в них обмінних процесів.

7. Запропоновані в роботі способи оцінювання якості електропостачання включають спосіб візуалізації енергетичних процесів в електротехнічних системах,

що ґрунтується на сформованій в роботі системі критеріїв та показників, а також на особливостях побудови енергетичних профілів, які дають змогу виконувати задачу оцінювання енергетичних процесів у локальних електротехнічних системах з джерелами РГ у багатокритеріальній постановці. Так при значенні всіх нормалізованих коефіцієнтів  $K_i < 1$  можна зробити висновок про відповідність параметрів енергетичних процесів та режимів нормативним вимогам.

8. Отримані результати роботи знайшли практичне застосування при проектуванні наземного космічного ракетного комплексу КРК «ЦИКЛОН-4» у ФР Бразилії (зменшено проектну потужність КП на 8%), у МРЕМ м. Мукачево, у ПАТ «Ферротрейдинг» м. Запоріжжя як елементи концепції «Інтелектуальне місто», запропонованої у співавторстві та впровадженої в м. Мукачево й у навчальному процесі кафедри електропостачання НТУУ «КПІ».

### СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Денисюк С.П. Аналіз надійності роботи компенсаторів в системах електроживлення з нелінійним нестационарним навантаженням [Текст] / С.П. Денисюк, Д.Г. Дерев'яно // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2010. – Спец. вип. – С. 91–98. – ISSN 1813-5420.

2. Денисюк С.П. Аналіз якості енергетичних процесів в системах електроживлення з нелінійними нестационарними елементами [Текст] / С.П. Денисюк, Є.В. Сафроненко, Д.Г. Дерев'яно // Праці Інституту електродинаміки НАН України. – 2009. – Вип. 24. – С. 7–11. – ISSN 1727-9895.

3. Забезпечення надійності функціонування та стійкої роботи інтелектуальних енергетичних систем [Текст] / С.П. Денисюк, П.Й. Тарасевич, О.В. Сподинський, Д.Г. Дерев'яно // Праці Інституту електродинаміки НАН України. – 2010. – Вип. 27. – С. 27–33. – ISSN 1727-9895.

4. Денисюк С.П. Оптимізація режимів електропостачання в локальних системах з розосередженою генерацією [Текст] / С.П. Денисюк, Д.Г. Дерев'яно, П.С. Колесник // Праці Інституту електродинаміки НАН України. – 2011. – Спец. вип. – С. 30–37. – ISSN 1727-9895.

5. Денисюк С.П. Особливості застосування систем гнучкої передачі змінного струму (FACTS) в сучасних електроенергетичних мережах [Текст] / С.П. Денисюк, Д.Г. Дерев'яно // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2011. – № 1. – С. 29–37. – ISSN 1813-5420.

6. Дерев'яно Д.Г. Особливості оцінки стійкості та надійності роботи локальних систем з розосередженою генерацією [Текст] / Д.Г. Дерев'яно // Гірництво. – 2012. – № 21. – С. 28–32. – ISSN 2079-5688.

7. Денисюк С.П. Особливості аналізу впливу завад від різномірних типів джерел розосередженої генерації на процеси в навантаженнях [Електронний ресурс] / С.П. Денисюк, Д.Г. Дерев'яно, К.Ю. Щербань // Журнал інженерних наук. – 2014. – Т. 1, № 2. – С. В1–В7. – Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/VSU\\_tekh\\_2014\\_1\\_2\\_8](http://nbuv.gov.ua/UJRN/VSU_tekh_2014_1_2_8)

8. Денисюк С.П. Оцінка ефективності сумісної роботи розосереджених джерел генерації електроенергії, включаючи відновлювальні, в електроенергетичних системах [Текст] / С.П. Денисюк, Т.М. Базюк, Д.Г. Дерев'яно // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – 2013. – № 3(80). – С. 54–59. – ISSN 1995-0519.

9. Main features of the stability and reliability enhancement of electricity grid with DG in Ukraine based on IEEE standards [Text] / O.V. Kyrylenko, R. Strzelecki, S.P. Denysiuk, D.G. Derevianko // Технічна електродинаміка. – 2013. – № 6. – С. 46–50. – ISSN 1607-7970.

10. Денисюк С.П. Особливості оцінки якості електропостачання локальних електротехнічних систем з розосередженою генерацією [Текст] / С.П. Денисюк, Д.Г. Дерев'янку, К.Ю. Суменко // Гірництво. – 2015. – № 27. – С. 90–97. – ISSN 2079-5688.

11. Денисюк С.П. Аналіз електромагнітної сумісності елементів систем електропостачання при змінних параметрах генератора та навантажень [Текст] / С.П. Денисюк, О.Б. Рибіна, Д.Г. Дерев'янку // Праці Інституту електродинаміки НАН України. – 2010. – Спец. вип. – С. 30–37. – ISSN 1727-9895.

12. Реалізація концепції інтелектуальне місто (енергетична складова) [Текст] / Т.М. Базюк, Д.Г. Дерев'янку, О.В. Бориченко, І.П. Радиш // Праці Інституту електродинаміки НАН України. – 2013. – Спец. вип. – С. 47–57. – ISSN 1727-9895.

13. Дерев'янку Д.Г. Особливості оцінки запасу стійкості локальних систем з різномірними джерелами генерації [Текст] / Д.Г. Дерев'янку // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2013. – Спец. вип. – С. 15–19. – ISSN 1813-5420.

14. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір «Концепція формування інтелектуального міста (енергетична складова)» / С.П. Денисюк, Т.М. Базюк, Д.Г. Дерев'янку. – № 49397; заявл. 28.03.2013; зареєстр. 30.05.2013.

15. Дерев'янку Д.Г. Аналіз впливу сонячних електростанцій на показники якості електричної енергії [Електронний ресурс] / Д.Г. Дерев'янку, В.В. Мирошніченко // Енергетика. Екологія. Людина. Наукові праці НТУУ «КПІ», ІЕЕ / Зб. тез доповідей – 2013. – С. 439–445. – Режим доступу до журн. : <http://en.iee.kpi.ua/files/2013/konference2013.pdf>.

16. Мирошніченко В.В. Особливості оцінки стійкості та ЕМС роботи локальних систем з розосередженою генерацією [Електронний ресурс] / В.В. Мирошніченко, Д.Г. Дерев'янку // Енергетика. Екологія. Людина. Наукові праці НТУУ «КПІ», ІЕЕ / Зб. тез доповідей. – 2012. – С. 198–204. – Режим доступу до журн. : <http://en.iee.kpi.ua/files/2012/konference2012.pdf>.

17. Денисюк С.П. Особливості оцінки стійкості, надійності живлення та рівня ЕМС в системах живлення електрифікованого транспорту [Електронний ресурс] / С.П. Денисюк, Д.Г. Дерев'янку, В.В. Мирошніченко // Електрифікація транспорту. - 2012. - № 3. - С. 53-56. - Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/eltr\\_2012\\_3\\_12](http://nbuv.gov.ua/UJRN/eltr_2012_3_12)

18. Дерев'янку Д.Г. Багатокритеріальна оцінка якості електропостачання локальних електротехнічних систем з розосередженою генерацією [Текст] : Зб. тез допов. міжнар. наук.-практ. конф. [«Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – 2015»], (19–21 травня 2015 р., м. Київ) / Д.Г. Дерев'янку / НТУУ «КПІ». – 2015. – С.28–29.

## АНОТАЦІЯ

**Дерев'янку Д.Г. Оцінювання ефективності регулювання енергетичних процесів в локальних електротехнічних системах з джерелами розосередженої генерації. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ, 2016.

У дисертаційній роботі розроблено та вдосконалено методи, практичні рекомендації та алгоритми для реалізації задач оцінювання усталених режимів роботи ЛЕС, які містять джерела РГ. Розроблено теоретичні засади та сформовано практичні підходи до оцінки стабільності та надійності функціонування виділених систем в усталених режимах з урахуванням особливостей функціонування різнотипних джерел РГ і наявності коригуючих пристроїв у структурі локальних електротехнічних систем.

Запропоновано методи визначення «винуватців» порушення стабільності і надійності функціонування локальних електротехнічних систем з джерелами розосередженої генерації на основі оцінки інтенсивності протікання обмінних процесів в перетинах локальних електротехнічних систем. При оцінці стабільності та надійності функціонування локальних електротехнічних систем доцільне проведення декомпозиції показників на складові, з урахуванням частки генерації від різнотипних джерел генерації. Слід зазначити, що запропонований у роботі спосіб оцінки надійності в локальних електротехнічних системах з джерелами розосередженої генерації є універсальним по відношенню до показників надійності, описаних у стандарті IEEE 1366, котрі застосовуються в Україні. Запропоновані методи і способи пройшли апробацію під час проведення енергетичного обстеження на електростанції з джерелами розосередженої генерації.

**Ключові слова:** локальні електротехнічні системи, розосереджена генерація, стабільність, надійність, обмінні процеси, регулювання параметрів енергетичних процесів, оптимізація режимів.

## АНОТАЦІЯ

**Деревянко Д.Г. Оценка эффективности регулирования энергетических процессов в локальных электротехнических системах с источниками распределённой генерации.** – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – электротехнические комплексы и системы. – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Киев, 2016.

В работе представлены методы, практические рекомендации и алгоритмы для реализации задач оценивания установившихся режимов работы локальных электротехнических систем, содержащих источники распределенной генерации. Разработаны теоретические основы и сформированы практические подходы к оценке стабильности и надежности функционирования выделенных систем в установившихся режимах с учетом особенностей функционирования разнотипных источников распределенной генерации и наличия корректирующих устройств в структуре локальных электротехнических систем.

Предложены методы определения «виновников» нарушения стабильности и надежности функционирования локальных электротехнических систем на основе оценки интенсивности протекания обменных процессов в сечениях локальных электротехнических систем при оценке стабильности в упомянутых системах. При оценке надежности функционирования локальных электротехнических систем с источниками распределенной генерации предложено проведение декомпозиции показателей оценки надежности на составляющие, с учетом доли генерации от разнотипных источников распределенной генерации. Следует отметить, что способ оценки надежности в локальных электротехнических системах универсален по

отношению к показателям надежности, описанным в стандарте IEEE 1366 и применяемым в Украине. Предложенные в работе методы оценки качества электроснабжения основаны на способе визуализации энергетических процессов в локальных электротехнических системах. Они основаны на расширенной в работе системе критериев и показателей, а также на особенностях построения энергетических профилей, позволяющих выполнять задачу оценивания энергетических процессов в локальных электротехнических системах с источниками распределенной генерации в многокритериальной постановке. Эти методы и способы прошли апробацию при проведении энергетического обследования на электростанции с источниками распределенной генерации.

В ходе измерений было определено, что в системе с источниками распределенной генерации присутствует значительная доля несимметрии в параметрах энергетических процессов. Величина несимметрии определена по предложенным в работе методам расчета составляющих реактивной мощности по Фризе для трехфазных систем. Результаты анализа подтверждают адекватность предложенных в работе методов, алгоритмов и приемов оценки энергетических процессов для повышения эффективности регулирования их параметров в упомянутых системах.

**Ключевые слова:** локальные электротехнические системы, распределенная генерация, стабильность, надежность, обменные процессы, регулирование параметров энергетических процессов, оптимизация режимов.

## ABSTRACT

**D. Derevianko. Evaluation of the effectiveness of regulation of energy processes in the local electrical systems with DG sources.** – Manuscript.

Thesis on the competition of graduate degree of candidate of technical sciences on the specialty 05.09.03 – electrotechnical complexes and systems. – National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, 2016.

The thesis is about development of methods, algorithms and practical recommendations for the assessment of the steady state modes of operation of local electrotechnical systems containing distributed generation sources. The theoretical basis and practical approaches are formed to evaluate the stability and reliability of the selected systems in the steady functioning modes allowing the assessment of diverse distributed generation sources and presence of corrective devices in the structure of local electrotechnical systems. The methods of determining the "causer" of violation of the process stability and reliability of local electrotechnical systems based on the assessment of the intensity of the flow of metabolic processes in sections of local electrotechnical systems.

The methods of determining the causer of disturbances that breach the stability and reliability of local electrotechnical systems with distributed generation sources are based on estimates of flow intensity of metabolic processes in sections of the local electrotechnical systems. During the evaluation of the stability and reliability of local electrical systems the appropriate indicators should come over the decomposition into components, taking into account the share of generation from diverse sources of distributed generation. The methods and means were tested during the energy audit at the power station with distributed generation.

**Key words:** Local electrotechnical systems, alternative and renewable energy sources, distributed generation, stability, reliability, regulation of the parameters of energy processes, process optimization.

