

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

ГОРЕНКО ДАР'Я СЕРГІЇВНА



УДК 621.311.1[621.314:621.318.4]

**ОЦІНЮВАННЯ ОБМІННИХ ПРОЦЕСІВ У ЛОКАЛЬНИХ СИСТЕМАХ
ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З ДЖЕРЕЛАМИ РОЗОСЕРЕДЖЕНОЇ
ГЕНЕРАЦІЇ**

Спеціальність 05.09.03 – Електротехнічні комплекси та системи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидат технічних наук

Київ – 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі електропостачання Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Науковий керівник

доктор технічних наук, професор

Денисюк Сергій Петрович,

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, директор Інституту енергозбереження та енергоменеджменту.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, старший науковий співробітник

Новський Володимир Олександрович,

Інститут електродинаміки Національної академії наук України, м. Київ;

кандидат технічних наук, доцент

Якимець Сергій Миколайович,

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук.

Захист відбудеться «14» квітня 2020 р. о 14³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.20 у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ – 56, вул. Борщагівська 115, корп. 22, ауд. 316.

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці ім. Г.І. Денисенка Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ – 56, пр. Перемоги, 37.

Автореферат розіслано «__» березня 2020 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
канд. техн. наук, доцент

А.І. Замулко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність. Модернізація електроенергетики України, – зокрема, електротехнічних комплексів та систем, повинна здійснюватись згідно вимог концепції Smart Grid. На сьогодні електроенергетичний сектор України характеризується збільшенням частки відновлюваних джерел енергії, урізноманітненням топологій електроенергетичних систем, розвитком конкурентного ринку електроенергії, що в цілому призводить до суттєвої зміни основних режимів роботи електроенергетичних об'єктів.

У звітах World Economic Forum (2017 p.) та International Energy Agency (2017 p.), у висновках щодо Робочої програми (ref. C18-WPDC-30-06, 2019 p.) Council of European Energy Regulators та інших провідних енергетичних компаній світу визначено, що процес реформування електроенергетичної галузі в рамках сучасного енергетичного переходу та реалізації концепції Smart Grid передбачає такі складові як децентралізацію, диджиталізацію, декарбонізацію та динамічне регулювання. Згідно положень нормативних документів міжнародних організацій ІЕС, ІЕЕЕ та ін. реформування електроенергетичної галузі включає в себе побудову сучасних локальних систем електропостачання (ЛСЕП) – Microgrid з джерелами розосередженої генерації (РГ).

Побудова сучасних ЛСЕП згідно концепції Smart Grid стикається з проблемами неоптимальної генерації електроенергії, неврівноваженості напруги між кількома сумісно працюючими генераторами та споживачами електроенергії, низької якості електроенергії (ЯЕ) та порушенням рівнів електромагнітної сумісності (ЕМС) і усунення негативних взаємних впливів. Для вирішення цих проблем виникає необхідність поглибленого аналізу та оптимізації енергетичних процесів у ЛСЕП, зокрема, – аналізу складових додаткових втрат з використанням потужності Фризе Q_F та обмінних процесів, у першу чергу – на основі обмінної потужності $Q_{об}$.

Дослідження питань оцінки обмінних процесів у ЛСЕП, проблем взаємного впливу джерел РГ та електричних мереж, моделювання їх сумісної роботи відображені у дослідженнях як вітчизняних науковців: Буткевича О.Ф., Денисюка С.П., Жаркіна А.Ф., Жежеленка І.В., Жуйкова В.Я., Каплуна В.В., Кириленка О.В., Кулика В.В., Кузнєцова В.Г., Лежнюка П.Д., Новського В.О., Праховника А.В., Саєнка Ю.Л., Шидловського А.К., Ядутьського О.С., Якимця С.М. так і іноземних: Гамм А.З., Демирчан К.С., Жарков Ф.П., Blaabjerg F, Kashem M.A., Moren J., Saaki I., Sun J. У більшості праць наведено основні схемні рішення побудови ЛСЕП, відповідні розрахункові співвідношення, сформульовано вимоги щодо стану ЕМС, впливу завад у системах централізованого електропостачання.

Потребують подальшого розгляду питання врахування особливостей роботи ЛСЕП з різними джерелами РГ, відповідно концепції Smart Grid. Таким чином, у дисертаційній роботі поставлена актуальна наукова задача, яка полягає у підвищенні ефективності оцінювання обмінних процесів у ЛСЕП з джерелами РГ з урахуванням зниження ЯЕ.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Виконані у роботі дослідження відповідають напрямку «Енергетика та енергоефектив-

ність» Закону України № 2519-VI від 09.09.2010 р. «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки». Дисертаційне дослідження виконувалось згідно з планом наукових робіт кафедри електропостачання КПП ім. Ігоря Сікорського у рамках найважливіших напрямків фундаментальних та прикладних наукових досліджень: «Методи керування виробництвом, передачею, розподілом, перетворенням та споживанням електричної енергії. Керування ефективністю енерговикористання». Результати відображені в науково-дослідницьких роботах «Науково-методичні основи оптимізації структурно-параметричних рішень гнучких систем електропостачання в умовах реструктуризації ринку електроенергії» (№ держреєстрації 0115U002514) та «Розроблення науково-методологічних основ агрегування та керування віртуальними електростанціями і активними споживачами в умовах енергоринку» (№ держреєстрації 0117U004285).

Мета і задачі досліджень. Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності оцінювання обмінних процесів у локальних системах електропостачання з джерелами розосередженими генерації з урахуванням зниження якості електроенергії.

Для досягнення поставленої мети дисертаційної роботи були поставлені та сформульовані такі задачі досліджень:

- проаналізувати методи оцінювання обмінних процесів у перетині ЛСЕП з джерелами РГ;
- оцінити обмінні процеси в перетині ЛСЕП за умови впливу різних типів джерел імпульсних завад;
- поширити методи аналізу обмінних процесів на міжфазний енергообмін у трифазних ЛСЕП з урахуванням амплітудного дисбалансу, розфазування генераторів, частотної нестабільності;
- проаналізувати обмінні процеси в перетині ЛСЕП, обумовлені впливом джерел несинусоїдальних напруги та струму, викликаних особливостями режимів роботи як окремих елементів, так і системи в цілому;
- розробити метод оцінювання обмінних процесів у перетині ЛСЕП з урахуванням реальних електротехнічних характеристик трансформаторів;
- розробити нормативно-методичне та програмно-алгоритмічне забезпечення розширеного енергетичного аудиту з використанням обмінної потужності $Q_{\text{об}}$.

Об'єкт дослідження – обмінні процеси у локальних системах електропостачання з джерелами розосередженої генерації.

Предмет дослідження – методи та засоби підвищення ефективності оцінювання обмінних процесів у локальних системах електропостачання з джерелами розосередженої генерації.

Методи дослідження. Науково-методичну основу виконаних досліджень склали такі методи: експертних оцінок, системного аналізу, математичного моделювання, алгоритми та методи оцінки обмінних процесів, алгоритми оцінки додаткових втрат при передачі електроенергії в електротехнічних системах та методи комп'ютерного моделювання. Дослідження виконано за допомогою програмного забезпечення MatCAD та Excel.

Наукова новизна одержаних результатів:

Вперше:

- отримано нові функціональні залежності оцінки обмінних процесів від рівня магнітного зв'язку у перетині ЛСЕП з урахуванням реальних електротехнічних характеристик трансформаторів;
- отримано оригінальні співвідношення, які визначають вплив кондуктивних завад різної форми на рівень неоптимальності у перетині ЛСЕП, що дало змогу уточнити інтенсивність взаємного впливу обладнання;
- запропоновано новий критерій оцінки взаємного впливу та рівня обмінних процесів у перетині ЛСЕП з урахуванням нормованих показників якості (ПЯЕ) для несиметрії та несинусоїдальності сигналів, відхилень напруги та частоти.

Удосконалено:

- методологію оцінювання обмінних процесів за рахунок розширення її використання на багатофазні ЛСЕП з кількома багатофазними джерелами РГ, зокрема, отримано нові співвідношення деталізації складових обмінної потужності з врахуванням несинусоїдальності та несиметрії навантаження, амплітудного дисбалансу, розфазування генераторів та частотної нестабільності паралельно працюючих генераторів.

Набула подальшого розвитку:

- методика визначення показників якості електроенергії в ЛСЕП з різними за природою джерелами РГ та оцінки їх взаємного впливу, яка дала змогу враховувати особливості протікання енергетичних процесів у елементах ЛСЕП, у тому числі і систем з електромагнітним перетворенням енергії.

Практичне значення одержаних результатів полягає у такому:

- розроблено спеціалізоване програмно-алгоритмічне забезпечення оцінки обмінних процесів у досліджуваному перетині системи електропостачання, яке дало змогу проводити розрахунок обмінної потужності незалежно від будови та режимів роботи ЛСЕП і використовувати лише виміряні значення струму $i(t)$ та напруги $u(t)$ в досліджуваному перетині за необхідний проміжок часу із заданою точністю; спростити процедуру розрахунку обмінної потужності у разі проведення експрес-аудитів;
- створено нормативно-методичне та програмно-алгоритмічне забезпечення оцінки обмінних процесів у ЛСЕП з джерелами РГ, яке широко використовувалося для проведення електротехнологічного обстеження, на підприємствах КП «Васильківська шкіряна фірма», м. Васильків, Київська обл. (акт впровадження від 24.10.2018 р.), ТОВ «Простонет», с.м.т. Калинівка, Київська обл. (акт впровадження від 21.05.2019 р.). Розроблено та впроваджено комплексні технічні, режимні та організаційні заходи з підвищення енергоефективності, що забезпечило значний економічний ефект від їхнього впровадження;
- матеріали дисертаційної роботи використані у рамках науково-дослідної роботи «Розроблення науково-методологічних основ агрегування та керування віртуальними електростанціями і активним споживачем в умовах енергоринку» (довідка про використання у НДР від 07.11.2019 р. № державної реєстрації 0117U004285);

– результати теоретичних та практичних досліджень впроваджено в навчальний процес кафедри електропостачання КПІ ім. Ігоря Сікорського та Васильківського коледжу Національного авіаційного університету та покладено в основу курсів лекцій з дисциплін «Силова електроніка в системах електропостачання», «Інтелектуальні системи в енергетиці», «Сучасні методи та технології підвищення енергоефективності», «Засоби малої енергетики» (акт впровадження від 07.11.2019 р.), «Електротехнічні комплекси», «Електроніка, мікросхемотехніка та мікропроцесорні пристрої», «Електро- та гідропривід в системах авіоніки повітряних суден» (акт впровадження від 2.09.2019 р.).

Особистий внесок здобувача. Дисертація є завершеною науковою працею. Всі наукові положення і результати, наведені в дисертаційній роботі та [11, 13, 14, 16], отримано автором особисто і полягають у вирішенні проблем підвищення ефективності оцінки обмінних процесів у ЛСЕП з джерелами РГ з врахуванням особливостей роботи їх елементів. У друкованих працях, які були опубліковані у співавторстві, здобувачеві належать такі результати: аналіз можливостей впровадження віртуальних електростанцій з врахуванням особливостей вітчизняних електричних мереж [3, 8, 23]; аналіз обмінних процесів в однофазних ЛСЕП з використанням макромодельовання складних імпульсних сигналів різної тривалості [9] та форми [20, 24]; поширено теорію обмінних процесів на трифазні ЛСЕП [4, 7] і виведено нові співвідношення для визначення перетоків потужності між трифазним джерелом та трифазним навантаженням [2, 6]; аналіз обмінних процесів у гібридних системах електроживлення на базі нетрадиційних джерел електроенергії [1, 2, 8]; оцінка обмінної потужності в трифазних локальних системах електропостачання з врахуванням нормованих показників якості електроенергії [5]; оцінка взаємного впливу кількох різнотипних джерел розосередженої генерації [2, 12 – 14]; аналіз електромагнітної сумісності та непрямих впливів на життєдіяльність людини [22]; досліджено обмінні процеси в перетинах бортових систем електроживлення [18, 19, 21]; оцінка обмінних процесів з врахуванням магнітних зв'язків між елементами ЛСЕП [10, 16]; оцінка взаємного впливу елементів (груп елементів) на елементи (групи елементів) [11, 15, 17].

Апробація результатів дисертації. Основні положення роботи та її результати доповідались, обговорювались та були схвалені на таких міжнародних науково-технічних конференціях: III, IV міжнародних науково-технічних та навчально-методичних конференціях «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку» (м. Київ, 2016 – 2017 рр.); VIII, X міжнародних науково-технічних конференціях «Енергетика. Екологія. Людина» (м. Київ, 2016, 2018 рр.); XVII, XVIII міжнародних науково-практичних конференціях «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті» (м. Київ, 2016, 2017 рр.); X Міжнародній науково-практичній конференції «Електрифікація транспорту «Транселектро – 2017» (м. Дніпро, 2017 р.); науковій конференції «Проблеми енергозбереження у промисловому районі. Наука та практика» (м. Маріуполь, 2017); Міжнародній науково-практичній конференції «Актуальні питання енергозбереження як вимога безпеки життєдіяльності» (м. Київ, 2018 р.); Międzynarodowa konferencja multidyscyplinarna «Kluczowe problemy edukacja i

nauka: perspektywy rozwoju dla Ukrainy i Polski» (Stalowa Wola, Polska, 2018); The international research and practical conference «The Development of Technical Sciences: Problems and Solutions» (Brno, The Czech Republic, 2018).

Публікації. Основні результати теоретичних та експериментальних досліджень викладені в 24 наукових працях, з яких 9 статей – у фахових наукових виданнях (1 scopus); 13 тез та доповідей на конференціях (2 у збірниках конференцій іноземних держав); 2 свідоцтва про реєстрацію авторського права на науковий твір.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 175 найменувань і 6 додатків. Загальний обсяг роботи становить 247 сторінок, у тому числі 158 сторінок основного тексту, 25 таблиць, 106 ілюстрацій за текстом.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність обраної теми дисертації, сформульовано основну мету і завдання досліджень, визначено наукову новизну, практичне значення отриманих результатів, наведено відомості щодо зв'язку дисертації з планами організації, де виконано роботу, здійснено огляд використаних методів досліджень, визначено особистий внесок здобувача в опублікованих у співавторстві наукових роботах, представлено інформацію щодо апробації та публікації результатів дисертації та впровадження основних положень роботи.

У **першому розділі** здійснено комплексний аналіз особливостей функціонування ЛСЕП з врахуванням сучасних вимог концепції Smart Grid та узагальнено визначення ЛСЕП – електрична розподільна система, що містить навантаження і джерела РГ, яка може працювати скоординовано і контролювано, будучи приєднаною до централізованої електричної мережі, та в ізолюваному режимі.

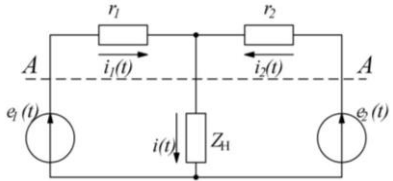
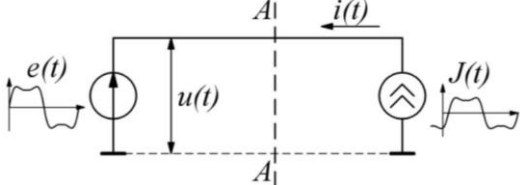
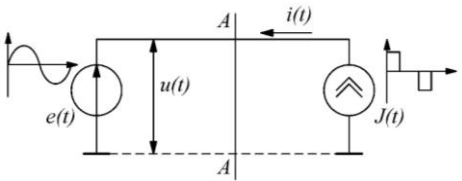
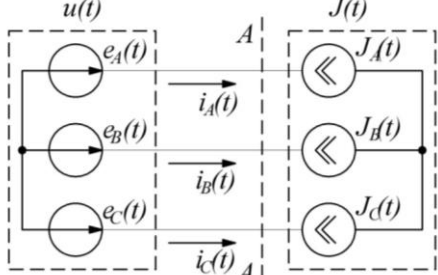
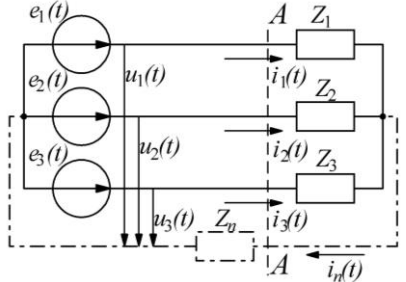
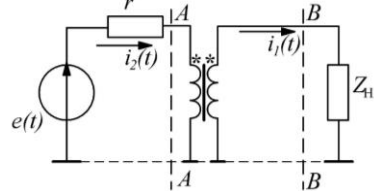
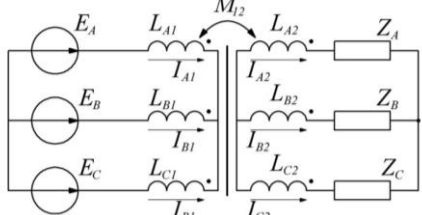
Проведений аналіз особливостей ЛСЕП як електротехнічного комплексу дозволив виявити ряд факторів (нестабільність, мінливість, необхідність гнучкості, порушення стійкості і т.п.), які призводять до ускладнення їх режимів роботи. Для вирішення цих проблем їх потрібно ідентифікувати або поставити їм у відповідність певні характеристики. Це можливо зробити з використанням обмінної потужності $Q_{об}$, яка за умови постійної інтенсивності перетворення електроенергії в інші види протягом періоду T визначається за формулою:

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

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 колі; P – активна потужність; U – діюче значення напруги.

Виконано синтез можливих впливів джерел РГ на енергетичну ефективність, якість електричної енергії та електромагнітну сумісність за умови їх роботи у складі ЛСЕП. Здійснено співставний аналіз методів оцінки обмінних процесів в ЛСЕП з джерелами РГ, їх переваг і недоліків. Побудовано систему макромоделей, що дають змогу проводити оцінку енергетичних процесів у перетині ЛСЕП з врахуванням різного виду впливу (табл. 1).

Таблиця 1

№ з/п	Вид впливу	Переваги використання обмінної потужності $Q_{об}$	Модель
1	Взаємний вплив елементів (груп елементів) ЛСЕП	Дає змогу відображати обмінні процеси між генераторами струму та напруги; співставляти обмінні процеси у різних перетинах ЛСЕП; аналізувати адресний вплив елемента (групи елементів) на елемент (групу елементів) ЛСЕП.	I 
2	Несинусоїдальність і несиметричність напруги та струму (в перетині системи)	Дозволяє відображати енергообмін за наявності різнойменних гармонік струму та напруги та їх несиметрії в перетині ЛСЕП; проводити аналіз обмінних процесів у перехідних режимах; визначати частку взаємного впливу елементів ЛСЕП, які характеризуються різними гармонічними складовими напруги $u(t)$ та струму $i(t)$.	II 
3	Імпульсний (в системі)	Дозволяє проводити аналіз впливу на обмінні процеси періодичної довільної імпульсної завади в обладнанні ЛСЕП; обмінних процесів у перехідних режимах; взаємного впливу елементів ЛСЕП, які характеризуються різними гармонічними складовими напруги $u(t)$ та струму $i(t)$ і враховувати зсуви фаз між однойменними гармоніками.	III 
4	Імпульсний (у обладнанні)	Дозволяє провести аналіз міжфазного енергообміну в перетині ЛСЕП при симетричному та несиметричному режимах роботи неважежень та / чи генераторів.	IV 
5	Міжфазний енергообмін в елементах системи при симетричних та несиметричних режимах	Дає можливість проаналізувати енергообмін між фазами в обладнанні при симетричному та несиметричному режимах роботи ЛСЕП. Дозволяє провести аналіз міжфазного енергообміну в перетині ЛСЕП при симетричному та несиметричному режимах роботи неважежень та / чи генераторів.	V 
6	Електромагнітний вплив у перетині ЛСЕП	Дає можливість адекватно оцінити потоки енергії та складання реального балансу потужності в реальних ЛСЕП з трансформаторами з врахуванням особливостей (амплітудного дисбалансу, розфазування генераторів, частотної нестабільності) протікання енергетичних процесів в елементах ЛСЕП з електромагнітним перетворенням енергії.	VI  VII 

У другому розділі проведено оцінку впливу обмінних процесів на роботу паралельно працюючих різнорідних генераторів на основі макромоделі I, представленої у табл. 1.

$$Q_{\text{ОБ.1}} = \frac{1}{T} \int_0^{t_1^+} u(t) \left(i_1(t) - u_{1.1}(t) \frac{P_{1.1}}{U_{1.1}^2} + u_{1.2}(t) \frac{P_{1.2}}{U_{1.2}^2} \right) dt = Q_{\text{ОБ.1.1}} - Q_{\text{ОБ.1.2}}; \quad (2)$$

$$Q_{\text{ОБ.2}} = \frac{1}{T} \int_0^{t_2^+} u(t) \left(i_2(t) - u_{2.2}(t) \frac{P_{2.2}}{U_{2.2}^2} + u_{2.1}(t) \frac{P_{2.1}}{U_{2.1}^2} \right) dt = Q_{\text{ОБ.2.2}} - Q_{\text{ОБ.2.1}},$$

де $Q_{\text{ОБ.1.1}}$, $Q_{\text{ОБ.2.2}}$ – складова обмінної потужності, що характеризує обмінні процеси, створені в перетині відповідним генератором; $Q_{\text{ОБ.1.2}}$, $Q_{\text{ОБ.2.1}}$ – складова обмінної потужності, що характеризує обмінні процеси, створені в перетині роботою сумісного генератора.

Обмінна потужність у перетині, що згенерована кількома джерелами, буде визначена як адитивна сума обмінних потужностей і відповідатиме виразу:

$$Q_{\text{ОБ.}\Sigma} = Q_{\text{ОБ.1}} + Q_{\text{ОБ.2}} =$$

$$= \frac{1}{T} \int_0^{t_1^+} u(t) \left(i_1(t) - u_{1.1}(t) \frac{P_{1.1}}{U_{1.1}^2} + u_{1.2}(t) \frac{P_{1.2}}{U_{1.2}^2} \right) dt + \frac{1}{T} \int_0^{t_2^+} u(t) \left(i_2(t) - u_{2.2}(t) \frac{P_{2.2}}{U_{2.2}^2} + u_{2.1}(t) \frac{P_{2.1}}{U_{2.1}^2} \right) dt.$$

На основі макромоделі побудовані характеристики (рис. 1, 2), що відображають обмінні процеси в перетині А–А за умови неузгодженої роботи двох генераторів (модель I, табл. 1). Було розглянуто фазний (рис. 1) та амплітудний (рис. 2) дисбаланс генераторів та отримано залежності, де криві 1 та 2 – характеристики, що відображають процеси, викликані у перетині А–А відповідними генераторами $Q_{\text{ОБ.1}}$ та $Q_{\text{ОБ.2}}$, а крива 3 – відповідає результуючому значенню $Q_{\text{ОБ.}\Sigma}$. Аналіз неузгодження за амплітудою $E_{m2} = E_m + \Delta E$ та фазою ЕРС δ генераторів Г1 та Г2 показав, що навіть незначні відхилення в амплітуді призводять до суттєвих перетоків потужності між генераторами.

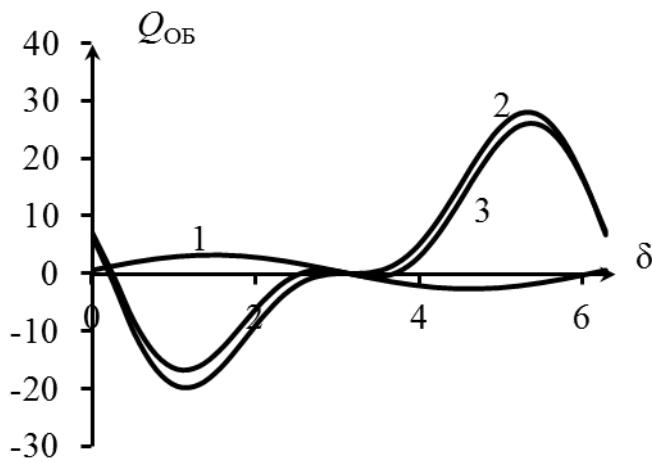


Рис.1. Залежність обмінної потужності $Q_{\text{ОБ}}$ в перетині А–А від кута зсуву фаз δ між ЕРС генераторів Г1 та Г2

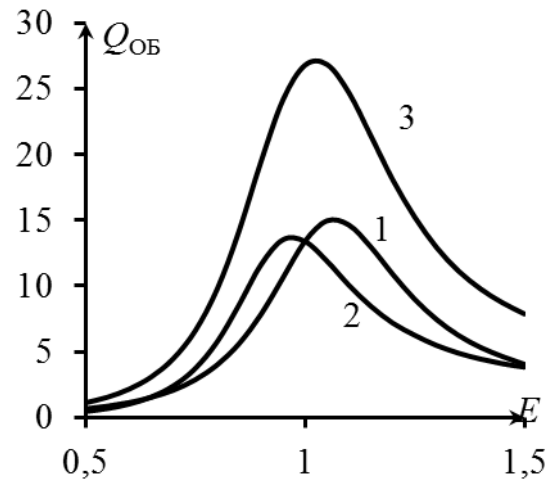


Рис.2. Залежність обмінної потужності $Q_{\text{ОБ}}$ в перетині А–А від амплітуди другого генератора E_{m2}

Рівень ЕМС, за умови паралельної роботи кількох джерел електроенергії, визначається за допомогою коефіцієнта частки взаємного впливу:

$$\Delta_i = Q_{\text{об},i} / \sum_{i=1}^N Q_{\text{об},i}, \quad (4)$$

де $Q_{\text{об},i}$ – обмінна потужність у перетині А–А, викликана i -м генератором; N – кількість паралельно працюючих генераторів.

За умови, що параметри генераторів однакові, незалежно від характеру навантаження, частка взаємного впливу кожного генератора буде однаковою $\Delta_1 = \Delta_2$ і взаємокомпенсується.

Взаємний вплив обладнання в перетині ЛСЕП може бути викликаний спотворюючим впливом навантаження (різними видами кондуктивних завод), навіть за умови узгодженої роботи джерел РГ. У результаті аналізу на основі макромоделі II (табл. 1) отримано нові співвідношення для оцінки обмінної потужності за умови несинусоїдальності з врахуванням коефіцієнтів пульсації k -ї гармонічної складової:

$$Q_{\text{об}(k)} = \frac{2 \cdot k}{T} \int_{T - \frac{\varphi_u^k}{k \cdot \omega}}^{T - \frac{\varphi_i^k}{k \cdot \omega}} u_k(t) \cdot i_{pk}(t) dt = \pm \frac{U_{mk} I_{mk}}{8\pi} (3 \sin(\varphi) - \sin(3\varphi)) \quad (5)$$

де $u_k(t) = U_{mk} \sin(k\omega t + \varphi_u^k)$; $i_{pk}(t) = I_{mk} \cos(k\omega t + \varphi_u^k) \sin \varphi^k$ – реактивна складова струму k -ї гармоніки; знак «+» або «-» залежить від характеру навантаження.

Кондуктивні завади за тривалістю та регулярністю можуть бути безперервними, короткотривалими, регулярними та випадковими. Безперервні кондуктивні завади легко передбачити та з ними простіше боротися. Тому було проведено аналіз безперервних завод різної форми та різної тривалості на основі наведеної макромоделі (модель III, табл. 1), де джерело напруги виступає в ролі еквівалентного генератора синусоїдальної напруги $u(t)$, а джерело струму – еквівалентного джерела періодичної завади $J(t)$. Було розглянуто чотири варіанти форми періодичної завади: синусоїдальна; трикутна; прямокутна; трапецеїдальна.

З рис. 3 видно, що найбільших значень досягає обмінна потужність для прямокутного періодичного імпульсу, а найменшого – для трикутного. Це пояснюється тим,

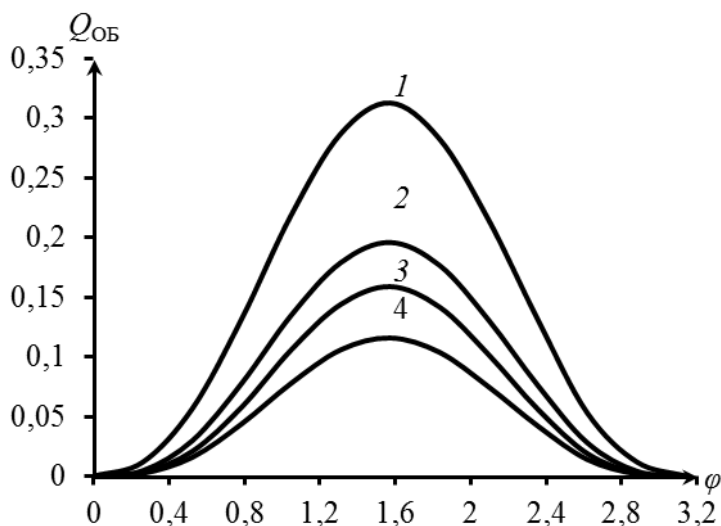


Рис. 3. Залежність $Q_{\text{об}}$ від кута зсуву φ між синусоїдальною напругою джерела живлення та імпульсною завадою різної форми

що площа трикутника менша за площу синусоїди, трапеції та прямокутника для однакових амплітуди I_m , частоти ω та фази φ_i .

Таблиця 2

№ з/п	Форма завади	Формула визначення обмінної потужності $Q_{\text{ОБ}}$
1	Синусоїдальна	$\frac{U_m I_m}{8\pi} (3 \sin(\varphi_i) - \sin(3\varphi_i))$
2	Трикутна	$\frac{U_m I_m}{\pi} \left(\sum_{k=1}^N \left[\frac{(-1)^{k-1}}{\pi^2} \cdot \frac{\sin((2k-1)\varphi_i) - (2k-1)\sin(\varphi_i)}{(2k-1)^2(k-1)k} \right] - \frac{\cos(\varphi_i) - \cos^2(\varphi_i)}{2} \right)$
3	Прямокутна	$\frac{U_m I_m}{2\pi} \left(\sum_{k=1}^N \left[\frac{\sin((2k-1)\varphi_i) - (2k-1)\sin(\varphi_i)}{(2k-1)(k-1)k\pi} \right] - \cos(\varphi_i) + \cos^2(\varphi_i) \right)$
4	Трапецеїдальна	$\frac{U_m I_m}{2\pi} \left(\sum_{k=1}^N \left[\frac{\sin(\alpha(2k-1))}{\pi\alpha} \cdot \frac{\sin((2k-1)\varphi_i) - (2k-1)\sin(\varphi_i)}{(2k-1)^2(k-1)k} \right] - \cos(\varphi_i) + \cos^2(\varphi_i) \right)$

Побудовано залежності обмінної потужності для випадку дії прямокутної періодичної завади різної тривалості τ для випадків, коли зсув фаз між струмом та напругою рівний нулю $\varphi = 0$ та не рівний нулю $\varphi \neq 0$ (рис. 4).

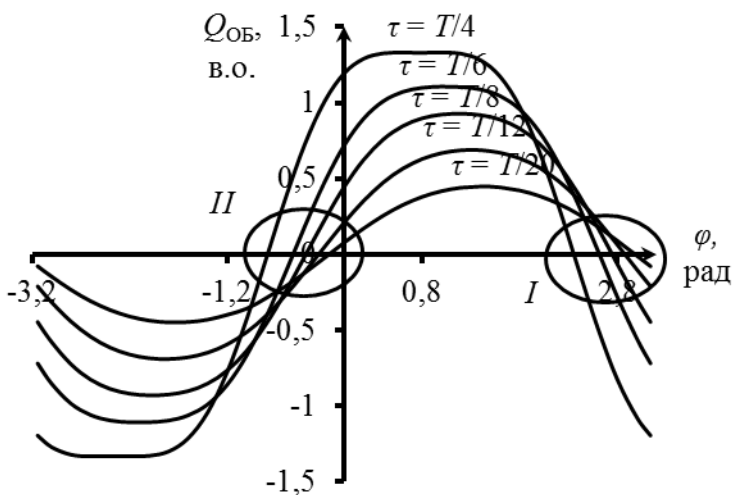
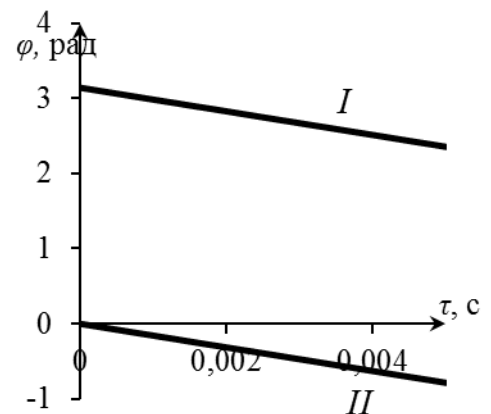


Рис. 4. Залежність обмінної потужності від кута зсуву фаз у разі різної тривалості імпульсу

Рис. 5. Множини кутів, за яких обмінна потужність $Q_{\text{ОБ}} = 0$

Використання залежностей, зображених на рис. 5, дає змогу визначати оптимальний режим роботи конкретного генератора, знаючи характер збурювальної дії та тривалість імпульсів. Значення кута зсуву фаз при $Q_{\text{ОБ}} = 0$ не залежить від значень еквівалентних амплітуд живлячої наруги U_m та струму I_m в необхідному перетині ЛСЕР.

Аналіз ЕМС має враховувати конструктивні особливості елементів, в основу роботи яких покладено електромагнітні явища. Зв'язок електромагнітних та обмінних процесів розглянуто на основі моделі ЛСЕР з трансформатором (табл. 1). В якості параметра для оцінки рівня магнітного зв'язку обрано коефіцієнт магнітного зв'язку k , який за ідеальних умов може набувати значення в межах від 0 до 1.

Обмінна потужність залежно від коефіцієнта магнітного зв'язку та коефіцієнта несинусоїдальності в загальному випадку:

$$Q_{\text{об}} = \frac{\sqrt{2}U_m^2 \left(a_0 + a_1 \cdot \sum_{j=2}^N a_j k_{(j)} + \sum_{i=2}^N a_i k_{(i)} \sum_{j=2}^N a_j k_{(j)} \right)}{4\omega\pi \left(L_1 + L_2 \pm k_\mu \sqrt{L_1 L_2} \right)}. \quad (6)$$

На основі макромоделі побудовано залежності (модель VI, табл. 1), які дають можливість, з врахуванням реальних експлуатаційних характеристик елементів з електромагнітними зв'язками, адекватно оцінити перетоки енергії та скласти реальний баланс потужності в реальних ЛСЕР з трансформаторами.

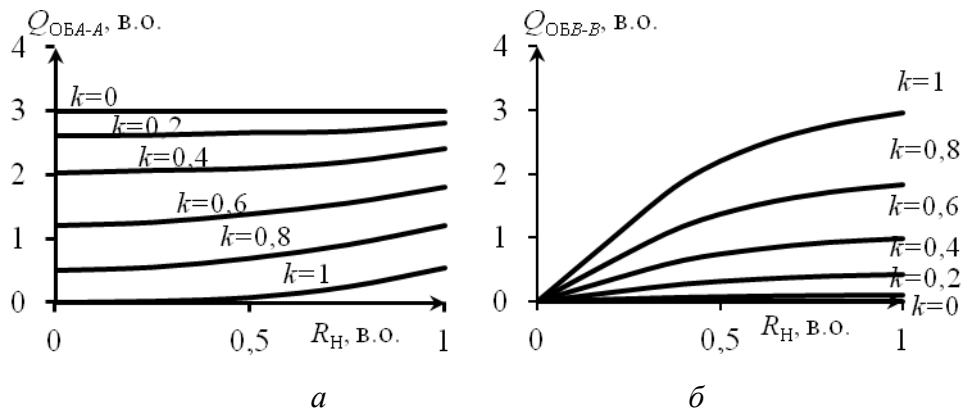


Рис. 6. Залежність обмінної потужності в перетині первинного та вторинного кола трансформатора від коефіцієнта магнітного зв'язку

У **третьому розділі** виконано аналіз особливостей опису обмінних процесів у трифазних ЛСЕР. У разі аналізу обмінних процесів у багатофазних ЛСЕР необхідно брати до уваги, що ці процеси відбуваються між багатофазним навантаженням та багатофазними генераторами, а також окремими фазами генератора та навантаження, тобто необхідно враховувати спосіб підключення фаз генератора і навантаження та їх взаємозв'язок, симетрію та несиметрію енергетичних режимів, урівноваженість та неурівноваженість фаз генераторів. У цьому випадку обмінна потужність визначається як у перетинах генератор – навантаження (модель V, табл. 1) $Q_{\text{об}\Sigma}$, так і в перетинах окремих фаз $Q_{\text{об}i}$ і в результаті дорівнює:

$$Q_{\text{об}\Sigma} = \sum_{i=1}^m Q_{\text{об}i}. \quad (7)$$

У випадку аналізу симетричних трифазних ЛСЕР з несинусоїдальними величинами (напруг або струмів), які мають однакову форму в усіх трьох фазах і зсунутих відносно один одного на $1/3$ періоду першої гармоніки містять у всіх трьох фазах однакові за амплітудою гармоніки, проте фазові зрушення між гармоніками фаз будуть різні. В залежності від виду з'єднання обмоток у перетині

ЛСЕП будуть присутні різні гармонічні складові. Якщо обмінна потужність через трифазний перетин дорівнює сумі відповідно обмінних потужностей через перетин відповідних фаз, то можна записати такі вирази:

- для обмінної потужності за першою гармонічною складовою:

$$Q_{\text{ОБ}(1)} = \frac{1}{T} \int_0^{t_A^+} u_A(t) i_{\text{Ар}(1)}(t) dt + \frac{1}{T} \int_0^{t_B^+} u_B(t) i_{\text{Вр}(1)}(t) dt + \frac{1}{T} \int_0^{t_C^+} u_C(t) i_{\text{Ср}(1)}(t) dt ; \quad (8)$$

- для обмінної потужності за третьою гармонічною складовою:

$$Q_{\text{ОБ}(3)} = \frac{1}{T} \int_0^{t_A^+} u_A(t) i_{\text{Ар}(3)}(t) dt + \frac{1}{T} \int_0^{t_B^+} u_B(t) i_{\text{Вр}(3)}(t) dt + \frac{1}{T} \int_0^{t_C^+} u_C(t) i_{\text{Ср}(3)}(t) dt ; \quad (9)$$

- для загальної обмінної потужності:

$$Q_{\text{ОБ}} = \frac{1}{T} \int_0^{t_A^+} u_A(t) i_{\text{Ар}}(t) dt + \frac{1}{T} \int_0^{t_B^+} u_B(t) i_{\text{Вр}}(t) dt + \frac{1}{T} \int_0^{t_C^+} u_C(t) i_{\text{Ср}}(t) dt , \quad (10)$$

де $i_{\text{Ар}}(t) = i_{\text{Ар}(1)}(t) + i_{\text{Ар}(3)}(t)$, $i_{\text{Вр}}(t) = i_{\text{Вр}(1)}(t) + i_{\text{Вр}(3)}(t)$, $i_{\text{Ср}}(t) = i_{\text{Ср}(1)}(t) + i_{\text{Ср}(3)}(t)$ – реактивні складові струмів відповідних фаз у перетині А–А.

Аналіз несинусоїдальності в перетині трифазної ЛСЕП було проведено на базі еквівалентної моделі IV (табл. 1).

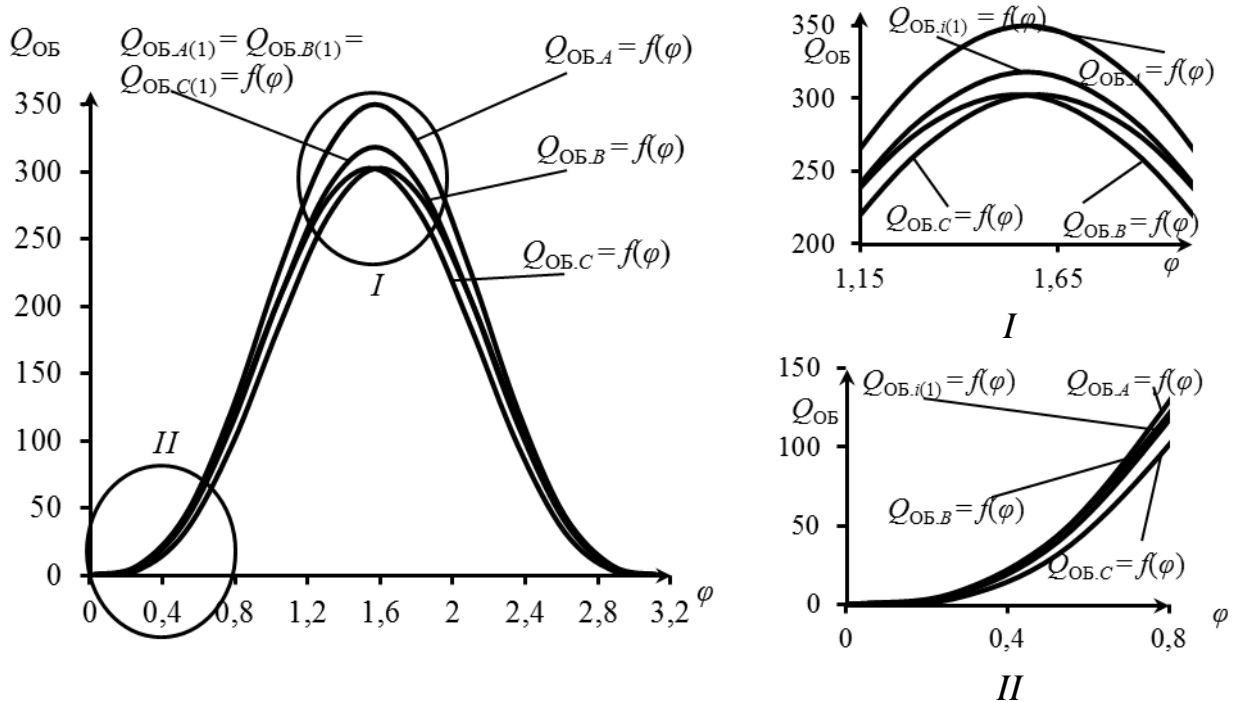


Рис. 7. Залежність обмінної потужності від кута зсуву фаз між напругою та струмом у відповідній фазі перетину ЛСЕП

На рис. 7 показано залежності складових обмінної потужності $Q_{\text{ОБ}}$ в перетині трифазної ЛСЕП для випадку, коли струм в перетині можна описати як симетричний несинусоїдальний. Незважаючи на те, що струми у перетині А–А симетричні, обмінні процеси протікають нерівномірно. Така розбіжність у розподілі обмінних потужностей спричинена наявністю вищих гармонічних скла-

дових (третьої гармоніки струму), оскільки розподіл обмінних потужностей основної гармоніки є рівномірним $Q_{\text{об},A(1)} = Q_{\text{об},B(1)} = Q_{\text{об},C(1)}$ (рис. 7).

Поряд з несинусоїдальністю у трифазних ЛСЕСП виникає проблема несиметрії, що пов'язана з наявністю великої кількості однофазних споживачів (модель IV, табл. 1). Основні діючі документи, що нормують ПЯЕ та електромагнітну сумісність технічних засобів, розрізняють нормально (НДМ) та гранично допустимі межі (ГДМ) значень ПЯЕ. НДМ та ГДМ значень коефіцієнтів несиметрії для електричних мереж напругою до 1 кВ відповідно дорівнюють $\pm 2,0$ та $\pm 4,0$ %. У роботі наведено нові співвідношення, які дають змогу пов'язати обмінні процеси з нормованими ПЯЕ (коефіцієнтами несиметрії за зворотною k_{U2} та нульовою k_{U0} послідовностями):

$$k_{U2} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^3 (P_n U_n^+)}{T \cdot U_2^2 (\sum Q_{\text{об}} - P^+)}}; \quad k_{U0} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^3 (P_n U_n^+)}{T \cdot U_0^2 (\sum Q_{\text{об}} - P^+)}} \quad (11)$$

де $U_n^+ = \int_0^{t_n^+} u_n(t)^2 dt$ – діюче значення напруги у відповідній фазі за інтервал t^+ .

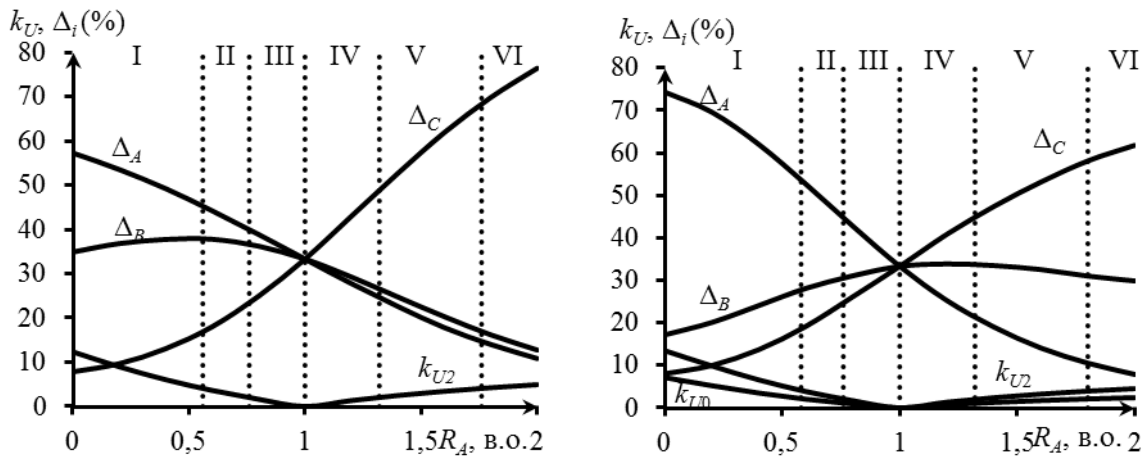


Рис. 8. Частка взаємного впливу та коефіцієнти несиметрії відповідно для три- та чотирипровідної трифазної ЛСЕСП

Аналіз обмінних процесів у разі роботи ЛСЕСП з врахуванням реальних перевищень ПЯЕ нормальних значень (несинусоїдальності та несиметрії) з використанням комплексної оцінки зв'язку між коефіцієнтами несиметрії (за зворотною k_{U2} та нульовою k_{U0} послідовностями) і коефіцієнтів несинусоїдальності (коефіцієнт спотворення синусоїдальної кривої напруги k_U , коефіцієнт n -ї гармонічної складової напруги $k_{U(n)}$) з обмінною потужністю $Q_{\text{об}}$ та часткою взаємного впливу Δ_i дає змогу оцінити з врахуванням нормованих ПЯЕ допустимі перетоки енергії як між фазами окремого трифазного навантаження, так і між фазами паралельно працюючих трифазних генераторів, а також урівноважити обмінні процеси у разі роботи несиметричного однофазного навантаження.

У разі роботи ЛСЕСП з джерелами РГ, параметри генерації яких є нестабільними, виникає проблема нерівномірності генерованої потужності. Проведено

аналіз паралельної роботи двох різних за потужністю генераторів ($P_1 = \text{const}$; $P_2 \in 0 \dots 1,5P_1$). У випадку зростання потужності допоміжного генератора в межах від 0 до $1,5P_1$ зростає і обмінна потужність (рис. 9). Фазна несиметрія здійснює суттєвий вплив на обмінні процеси в трифазній ЛСЕС, тоді як амплітудна несиметрія призводить до зменшення швидкості зростання обмінної потужності.

У трифазних ЛСЕС магнітні зв'язки можуть виникати як у навантаженні (коли один однофазний електротехнічний пристрій потрапляє у магнітне поле розташованого пору, інколи непов'язаного електрично іншого електротехнічного пристрою), так і у перетворювальному пристрої (трансформаторі) (модель VI, табл. 1).

Виходячи зі сказаного, аналіз енергетичних процесів у ЛСЕС без врахування магнітних процесів між елементами системи не є повноцінним. Для моделей, наведених у роботі, як для однофазної, так і для трифазної, відхилення результатів розрахунку обмінної потужності з урахуванням коефіцієнта магнітного зв'язку і без його врахування досягає 15% (рис. 10).

У **четвертому розділі** описано основні положення нормативно-методичного забезпечення оцінки обмінних процесів. У порівнянні з відомими методиками запропоноване нормативно-методичне забезпечення більш детально враховує особливості енергетичних процесів у ЛСЕС з джерелами РГ, наявність нелінійних спотворювальних навантажень (у тому числі й електромагнітних пристроїв), зокрема, вищих гармонічних складових у спектрах струму і напруги, двонаправленість потоків потужності в перетинах ЛСЕС, перетоки електроенергії між різнорідними джерелами електроенергії тощо.

Розроблено програмно-алгоритмічне (рис. 11) забезпечення аналізу обмінних процесів на основі розрахунку обмінної потужності та частки взаємного впливу в довільному перетині однофазної та/або трифазної ЛСЕС з використанням спеціалізованого програмного модуля, новизна якого підтверджена авторськими свідоцтвами на твір та актами впровадження.

Проведено аналіз та оптимізацію роботи електротехнічного обладнання електроенергетичного об'єкта, електрична схема якого наведена на рис. 12.

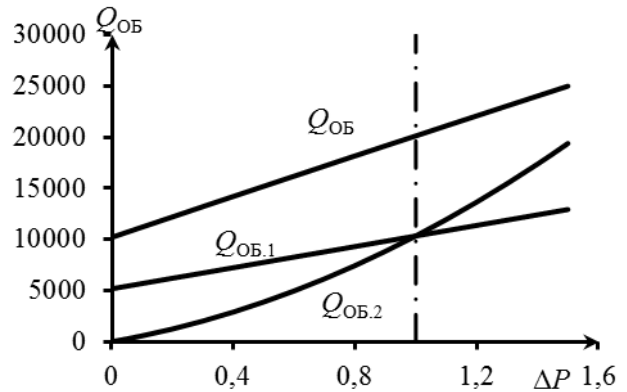


Рис. 9. Обмінні потужності у перетині трифазної ЛСЕС

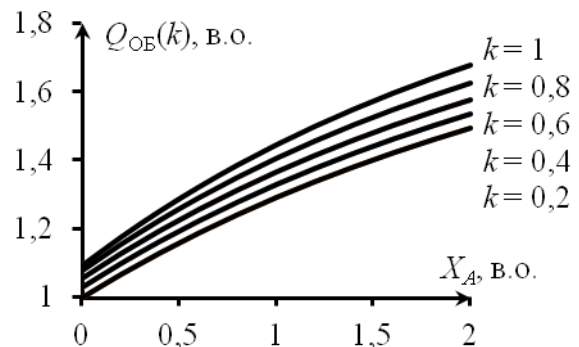


Рис. 10. Залежність обмінної потужності в перетині первинного кола трансформатора

Відповідно до алгоритму (рис. 11) та з використанням програмно-алгоритмічного забезпечення визначено розподіл дольового впливу електротехнічного обладнання в перетині $A1-A1$ підприємства (рис. 12). На рис. 13 наведено дольовий вплив п'яти споживачів I, II та III з встановленою потужністю 55 кВт, VI – 15 кВт та V – 5 кВт протягом 10-ти інтервалів.

У результаті проведеного аналізу було запропоновано виконати реорганізацію однофазних споживачів для V-ї групи, що в свою чергу дало змогу знизити споживання (як наслідок, зменшити втрати) електроенергії на 6,2 % та отримати позитивний економічний ефект.

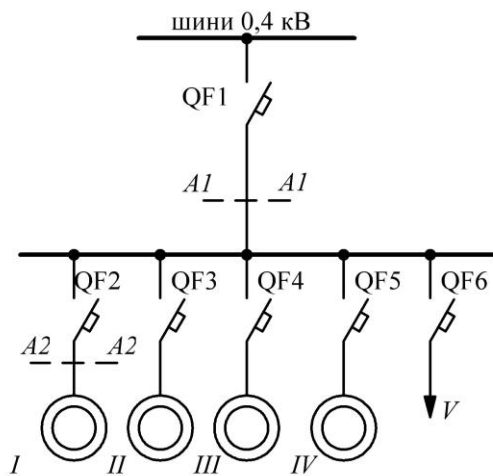


Рис. 12. Структурна схема електропостачання підприємства

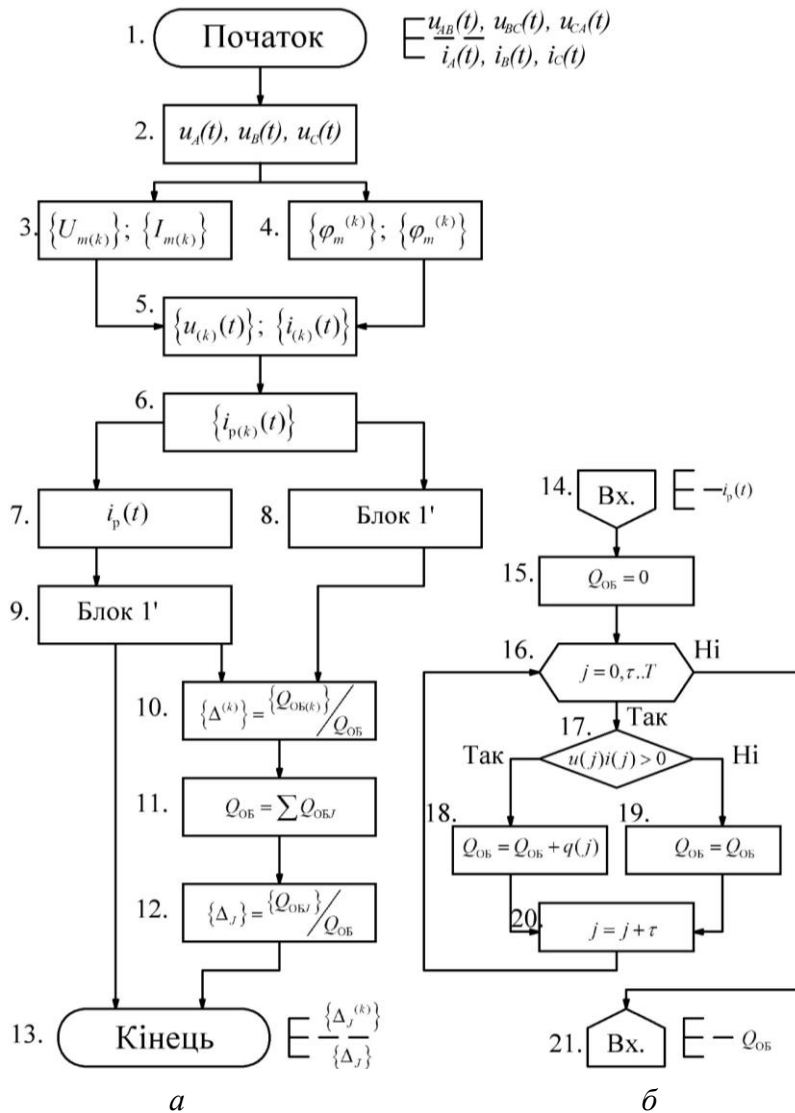


Рис. 11. Алгоритм розрахунку частки взаємного впливу J -ї фази та частки впливу k -ї гармонічної складової J -ї фази на інші фази

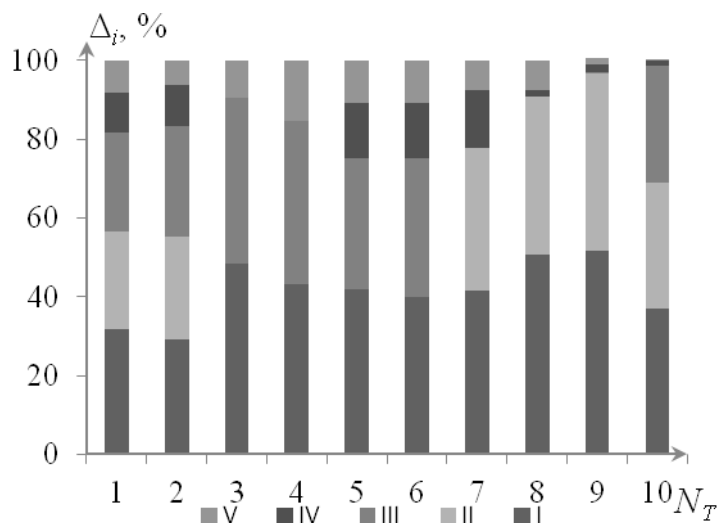


Рис. 13 Частка взаємного впливу споживачів у перетині $A1-A1$ для 10-ти досліджуваних часових інтервалів

Під час тестових випробувань резервного отримано та проаналізовано ряд вимірювальних даних. У результаті отримано розподіл обмінної потужності між генераторами та навантаженням (рис. 15) та фазний розподіл обмінної потужності $Q_{\text{Обі}}$ в перетині навантаження (рис. 16) для 11 досліджуваних часових інтервалів.

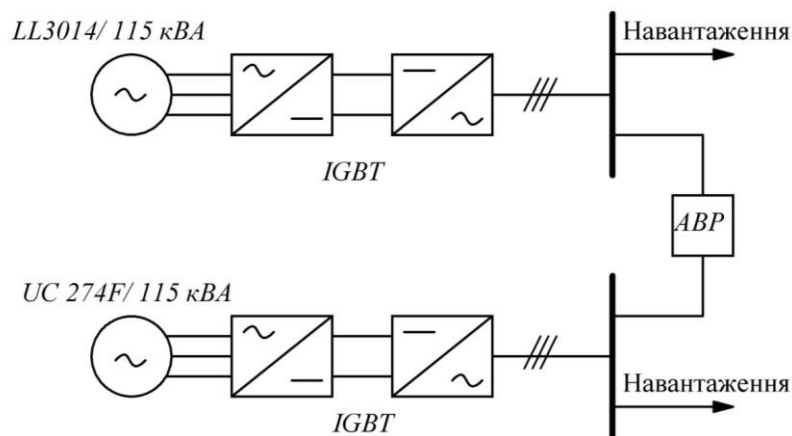


Рис. 14. Схема резервного живлення серверного обладнання на об'єкті ТОВ «Простонет»

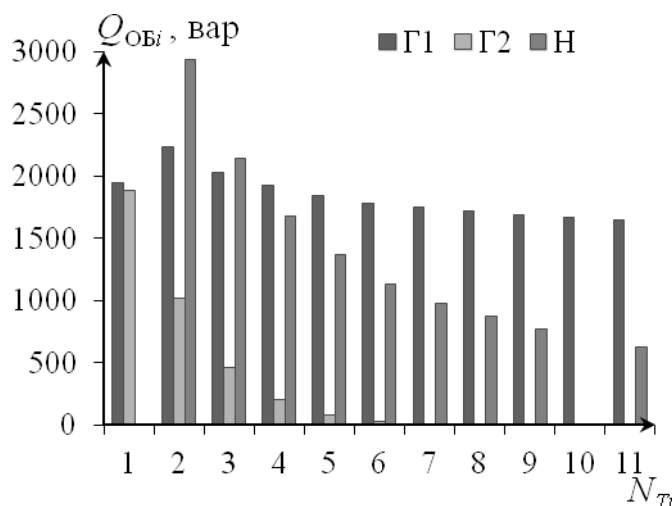


Рис. 15. Розподіл обмінної потужності між генераторами та навантаженням

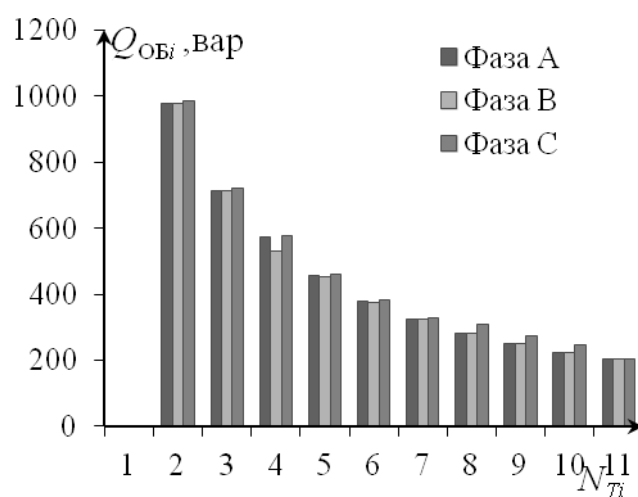


Рис. 16. Фазний розподіл обмінної потужності $Q_{\text{Обі}}$ в перетині навантаження

Первинна електротехнологічна експертиза на об'єктах показала, що в більшості випадків частина втрат електроенергії виникає з причин нерврівноваженої роботи силового обладнання підприємств. Отримані результати аналізу та пропозиції, підтверджені актами впровадження у виробничий та навчальний процес, що наведені у дисертаційній роботі, показують ефективність розроблених нормативно-методичних та програмно-алгоритмічних засобів у різних типах систем електропостачання, у тому числі і з використанням джерел РГ.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі набула подальшого розвитку теорія процесів енергообміну між елементами в ЛСЕП, у тому числі з джерелами РГ, враховуючи несинусоїдальність струмів та напруг, електромагнітний та спотворювальний взаємний вплив. Отримані в дисертаційній роботі результати становлять суттєвий внесок у подальший розвиток теорії обмінних процесів у нелінійних та нестационарних ЛСЕП.

1. Проведений співставний аналіз методів оцінки обмінних процесів у ЛСЕП з розосередженими джерелами енергії дав змогу визначити необхідність розширити відому систему показників якості електроенергії для адекватного оцінювання рівнів ЕМС в ЛСЕП з дотриманням вимог концепції Smart Grid та оцінки рівнів перетоків енергії за допомогою відомих показників (аналізу втрат електроенергії та їх складових, обмінної потужності).

2. Здійснений детальний аналіз обмінних процесів ЛСЕП за впливу різних типів джерел імпульсних завад з використанням спрощеної (формування макромоделей) еквівалентної однофазної моделі ЛСЕП зі заміною параметрів системи еквівалентними джерелам напруги та струму, що дало змогу врахувати реальні експлуатаційні характеристики вітчизняного обладнання (інверторів, трансформаторів, генераторів, ліній електропередачі і т.п.) при дії різних типів періодичних кондуктивних завад.

3. Розширено метод аналізу обмінних процесів для оцінки міжфазного енергообміну в перетині трифазної моделі ЛСЕП та виконано аналіз обмінних процесів у перетині трифазної ЛСЕП з двома джерелами живлення за умов амплітудного дисбалансу, розфазування генераторів та частотної нестабільності, що дало змогу проводити оцінку взаємного впливу суміжних фаз, перетоків потужності між фазами пристрою, нерівномірності завантаження фаз та уточнення енергетичних характеристик ЛСЕП для симетричного та несиметричного режимів роботи.

4. Проведено аналіз обмінних процесів ЛСЕП під впливом джерел не-синусоїдальних струму та/або напруги, викликані особливостями режимів роботи як окремих елементів, так і системи в цілому. Це дало змогу врахувати реальні експлуатаційні характеристики та їх вплив на якість електроенергії. Запропоновано використовувати в якості комплексного ПЯЕ частку впливу, що в перетині трифазної ЛСЕП з врахуванням існуючих нормованих ПЯЕ її НДМ досягає $\pm 6\%$, а ГДМ – $\pm 8\%$.

5. Проведено аналіз обмінних процесів у ЛСЕП з врахуванням реальних характеристик елементів з електромагнітними зв'язками (трансформаторами, реакторами, електричними машинами, лініями електропередачі і т.п.), що дало змогу адекватно оцінити перетоки енергії та складання реального балансу потужності (до 15 % додаткових втрат) в ЛСЕП з трансформаторами та враховувати особливості (амплітудного дисбалансу, розфазування генераторів, частотної нестабільності) протікання енергетичних процесів в елементах ЛСЕП з електромагнітним перетворенням енергії.

6. Розроблено нормативно-методичне та програмно-алгоритмічне забезпечення розширеного енергетичного аудиту для аналізу обмінних процесів у перетинах ЛСЕП різної конфігурації та різних режимів роботи їх елементів. У результаті це дало змогу визначати обмінну потужність та частку взаємного впливу в довільному перетині ЛСЕП з врахуванням особливостей їх конфігурації, режимів роботи окремих елементів та ЛСЕП в цілому, отримувати інформацію про обмінні процеси в ЛСЕП з різним рівнем інформаційного забезпечення (до 70 %) та адекватно враховувати особливості протікання режимів у

ЛСЕП, зокрема, двонаправленість потоків електроенергії та визначити реальний їх розподіл в елементах ЛСЕП.

7. Результати дисертаційної роботи рекомендовано для використання зазначеним вище організаціям та підприємствам (де за попередніми розрахунками можна досягти зниження економічних витрат до 7 %), іншим науковим та промисловим установам, які займаються аналізом та оптимізацією обмінних процесів у системах електропостачання, у тому числі й ЛСЕП з джерелами РГ.

8. Обґрунтованість наукових положень, висновків та рекомендацій підтверджується використанням коректних методів досліджень, узгодженням розрахунків та результатів експериментів, апробацією основних положень та отриманих результатів, представлених на наукових конференціях і семінарах.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Горенко Д.С., Мельничук Г.В. Аналіз впливу кондуктивних завод на систему з нетрадиційними джерелами електроенергії. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2016. №4. С. 72–80.

2. Денисюк С.П., Горенко Д.С. Аналіз обмінних процесів при паралельній роботі двох трифазних вітроустановок. *Відновлювальна енергетика*. 2018. №2(53). С. 46–56.

3. Денисюк С.П., Горенко Д.С. Аналіз проблем впровадження віртуальних електростанцій. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2016. №2. С. 25–33.

4. Денисюк С.П., Горенко Д.С. Обмінні процеси в трифазних автономних системах електроживлення. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2016. № 45. С. 9–15.

5. Денисюк С.П., Горенко Д.С. Оцінка обмінної потужності в трифазних локальних системах електропостачання з врахуванням нормованих показників якості електроенергії. *Праці Інституту електродинаміки*. 2018. №51. С. 20–27.

6. Денисюк С.П., Горенко Д.С., Соколовський П.В. Аналіз несиметричних режимів роботи в трифазних мережах з використанням обмінної потужності. *Вісник ВНТУ*. 2018. №1. С. 45–52.

7. Денисюк С.П., Горенко Д.С., Соколовський П.В., Степовий О.В. Перспективи використання технологій передачі електричної енергії на номінальній напрузі 20 кВ у розподільних електричних мережах України. *Електрифікація транспорту*. 2016. №12. С. 12–19.

8. Дерев'янюк Д.Г., Горенко Д.С. Особливості побудови та функціонування віртуальних електростанцій в умовах розвитку ОЕС України. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2016. №3. С. 61–69.

9. Denysiuk S., Horenko D. Analysis of exchange processes during parallel operation of wind electric units. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. № 4(8). P. 26–32.

10. Денисюк С.П., Горенко Д.С. Свідectво про реєстрацію авторського права на науковий твір «Оцінка обмінної потужності в системах з магнітопов'язаними елементами. Алгоритм та нормативно-методичне забезпечення» № 78419; заявка від 26.03.2018р.; зареєстровано 19.04.2018 р.

11. Горенко Д.С. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на науковий твір «Нормативно-методичне забезпечення оцінки якості електроенергії з врахуванням обмінних процесів» № 88084; заявка від 10.04.2019 р.; зареєстровано 02.05.2019 р.

12. Горенко Д.С., Денисюк С.П. Аналіз обмінних процесів в гібридних системах електроживлення на базі нетрадиційних джерел електроенергії. Міжнародна науково-технічна та навчально-методична конференція *Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – 2016*. Київ, 30 травня – 1 червня 2016. С. 18–19.

13. Горенко Д.С. Обмінні процеси при паралельній роботі вітро- та гідро-електроенергетичних установках. Міжнародна науково-практична конференція *Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті*. Київ, 9 – 30 вересня 2016 р. С. 124–127.

14. Горенко Д.С. Аналіз обмінних процесів при паралельній роботі двох трифазних електрогенераторів. Міжнародна науково-практична конференція *Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті*. Київ, 28-30 вересня 2017р. С. 220–224.

15. Горенко Д.С., Степовий О.В. Аналіз впливу несинусоїдальної завади на однофазну систему електроживлення. Міжнародна науково-технічна та навчально-методична конференція *Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – 2017*. Київ, 25 – 27 квітня 2018. С. 22–23.

16. Горенко Д.С. Порівняння обмінних процесів в перетинах первинного та вторинного кіл трансформатора. Międzynarodowa konferencja multidyscyplinarna *Kluczowe problemy edukacja i nauka: perspektywy rozwoju dla Ukrainy i Polski*. Stalowa Wola, Polska. 20–21 lipca 2018. С. 79–83.

17. Горенко Д.С., Денисюк С.П., Радиш І.П. Електромагнітна сумісність та обмінні процеси в автономних системах електроживлення. Proc. The international research and practical conference *The Development of Technical Sciences: Problems and Solutions*. Brno, 27–28 April 2018. Vol. 1. Pp. 130–133.

18. Горенко Д.С., Мельничук Г.В. Кондуктивні завади в системах електрифікованого транспорту. Міжнародна науково-практична конференція. *Електрифікація транспорту «Транселектро – 2017»*. Дніпро, 20 – 21 грудня 2018. С. 15–20.

19. Горенко Д.С., Соколовський П.В., Радиш І.П. Особливості протікання енергетичних процесів в автономних системах електроживлення. Матеріали X Міжнародної науково-технічної конференції Інституту енергозбереження та енергоменеджменту *Енергетика. Екологія. Людина*. Київ, 26 – 27 квітня 2018. С. 26–29.

20. Денисюк С.П., Горенко Д.С. Аналіз обмінних процесів в системах зі складними видами сигналів. Міжнародна науково-технічна конференція *Енергетика. Екологія. Людина*. Київ, 5 – 7 червня 2016. С. 15–20.

21. Денисюк С.П., Горенко Д.С. Обмінні процеси в системах електрифікованого транспорту. Міжнародна науково-практична конференція. *Електрифікація транспорту «Транселектро – 2017»*. Дніпро, 20 – 21 грудня 2018. С. 15–20.

22. Денисюк С.П., Радиш І.П., Горенко Д.С. Електромагнітна сумісність та непрямі впливи на життєдіяльність людини. Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. *Актуальні питання енергозбереження як вимога безпеки життєдіяльності*. Київ, 7 – 8 червня 2018. С. 15–20.

23. Соколовський П.В., Горенко Д.С. Вплив електромагнітної сумісності на функціонування віртуальних електричних станцій. Наукова конференція «Проблеми енергозбереження у промисловому районі. Наука та практика». Маріуполь, 16 – 18 травня 2017. С. 58–59.

24. Denysiuk S., Horenko D., Artemiev M., Tarhonskyi V. Evaluation of ex-chengable processes in local systems with flexible generation. *IEEE Internation Conference on Energy Smart Systems*. Kyiv, Ukraine. 17-19 April 2019. P. 233 – 238.

АНОТАЦІЇ

Горенко Д.С. Оцінювання обмінних процесів у локальних системах електропостачання з джерелами розосередженої генерації. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи. – **Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України.** – **Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України, м. Київ, 2019.**

У дисертаційній роботі здійснено комплексний аналіз особливостей функціонування ЛСЕП з врахуванням сучасних вимог концепції Smart Grid та виконано співставний аналіз методів оцінки обмінних процесів у ЛСЕП з джерелами РГ. На основі експертного аналізу виділено основні проблеми роботи ЛСЕП у вітчизняних системах електропостачання та енергозабезпечення. Розширено відому систему ПЯЕ для адекватного оцінювання рівнів ЕМС в ЛСЕП з дотриманням вимог концепції Smart Grid та оцінювання рівнів перетоків енергії на основі відомих показників.

Розроблено та апробовано спеціалізований програмний модуль та нормативно-методичне забезпечення розширеного енергетичного аудиту з використанням обмінної потужності, яке дає змогу: визначити обмінну потужність та частку взаємного впливу в довільному перетині ЛСЕП з врахуванням особливостей їх конфігурації, режимів роботи окремих елементів та ЛСЕП в цілому; отримати інформацію про обмінні процеси в ЛСЕП з різним рівнем інформаційного забезпечення; адекватно враховувати особливості протікання режимів у ЛЕС, зокрема, двонаправленість потоків електроенергії та визначити реальний їх розподіл в елементах ЛСЕП.

Ключові слова: Smart Grid, локальна система електропостачання, якість електроенергії, несиметрія, несинусоїдальність, електромагнітні завади, електромагнітна сумісність, обмінні процеси, обмінна потужність, взаємний вплив.

Horenko D.S. Estimation of exchange processes in local power supply systems in dispersed generaton. – Manuscript.

The thesis is for getting a degree of engineering sciences candidate in 05.09.03 specialty – «Electrotechnical complexes and systems» from **National Technical**

University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». – National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, 2019.

In the dissertation the complex analysis of the peculiarities of functioning of local power supply systems (LPSS) is carried out taking into account the modern requirements of the Smart Grid concept and the comparative analysis of methods of estimation of exchange processes in LPSS with dispersed energy sources is performed. The need to extend the known LPSS system to adequately assess the EMC levels in the LPSS with the requirements of the Smart Grid concept and to estimate the energy flow rates using known indicators is justified.

The analysis of exchange processes of LPSS under the influence of different types of impulse disturbances and sources of non-sinusoidal voltage and current caused by the peculiarities of modes of operation of both individual elements and the system as a whole for single and three-phase cross sections of LPSS is carried out. New relationships were obtained to evaluate the effect of non-sinusoidality and to take into account the ripple coefficients on the nature of the exchange processes.

The analysis of the exchange processes in LPSS has been carried out taking into account the real characteristics of the elements with electromagnetic bonds (transformers, reactors, transmission lines, etc.) and new relationships have been obtained, which link the exchange power and the coefficients of magnetic coupling for one and three-phase LPSS operating in both sinusoidal and non-sinusoidal modes, as well as in symmetric and asymmetric modes.

Regulatory and methodological support of the expanded energy audit with the use of exchange power was developed and tested. Regulatory and methodological support was used: for conducting an expanded energy audit at the enterprise of CE «Vasylkiv Leather Company» (Vasylkiv, Kyiv region); analysis of parallel operation of standby power supply systems both separately and in combination with the network used for powering server equipment of PLC «Prostonet»; was the basis for the course of lectures on discipline "Electrical Engineering Complexes", which will be taught in 2019 at Vasylkivsky College of NAU.

A specialized software module and regulatory and methodological support for the extended energy audit using exchange power have been developed and tested. The proposed regulatory and methodological support makes it possible to: determine the exchange power and the proportion of mutual influence in an arbitrary intersection of LPSS, taking into account the peculiarities of their configuration, modes of operation of individual elements and LPSS as a whole; to obtain information on exchange processes in the LPSS with different levels of information support; to adequately take into account the peculiarities of the flow of modes in the LPSS, in particular, the bidirectionality of electricity flows and to determine their real distribution in the elements of LPSS.

Key words: Smart Grid, local power supply system, electricity quality, asymmetry, non-sinusoidality, electromagnetic interference, electromagnetic compatibility, exchange processes, exchange power, mutual influence.