


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

МЕЛЬНИЧУК ГРИГОРІЙ ВАЛЕРІЙОВИЧ



УДК 621.311.1[621.314:621.318.4]

**РОЗВИТОК МЕТОДІВ АНАЛІЗУ СТАЦІОНАРНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ
ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ SMART-КОМПЛЕКСІВ**

Спеціальність 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидат технічних наук

Київ – 2021

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;

доктор технічних наук, професор

Шевченко Сергій Юрійович,

Національний технічний університет України
«Харківський політехнічний інститут»,
завідувач кафедри «Передача електричної
енергії»

Захист відбудеться «06» травня 2021 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.701.

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, просп.Перемоги, 37.

Автореферат розіслано « 2 » квітня 2021 р.

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

А.І.Замулко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми дослідження. Одним з ключових напрямків науково-технічного прогресу в електротехніці внаслідок загальних тенденцій поширення електрифікації і автоматизації, технологічних інновацій та нових економічних і інформаційних взаємодій є запровадження Smart-технологій на базі електротехнічних Smart-комплексів (далі – ЕТК-Smart) шляхом поширення концепції Smart Grid (інтелектуальна мережа).

Модернізація електротехнічних комплексів відповідно до вимог концепції Smart Grid у разі зростання частки відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) та урізноманітнення топологій електроенергетичних систем у цілому призводить до суттєвої зміни основних режимів роботи цих електротехнічних об'єктів, вирішення проблем ефективного функціонування систем електроживлення, реалізації законів оптимального керування у випадку врахування спотворень напруги та струму, забезпечення заданих рівнів електромагнітної сумісності (ЕМС).

Дослідження зазначених питань відображені в працях вітчизняних та іноземних науковців: Денисюка С.П., Жуйкова В.Я., Каплуна В.В., Кириленка О.В., Кулика В.В., Лежнюка П.Д., Мазуренка Л.І., Новського В.О., Островерхова М.Я., Папаїки Ю.А., Пересади С.М., Саєнка Ю.Л., Сиченка В.Г., Чорного О.П., Шаповала І.В., Шидловського А.К., Юрченка О.М., Ямненко Ю.С., Яндульського О.С., Akagi H., Kashem M.A., Lorenz R., Moren J., Saaki I., Strzelecki R., Sun J., Tilli A. та інших вчених.

Потребують подальшого розгляду питання забезпечення комплексного підходу до розробки, проектування, побудови та ефективного функціонування різних типів ЕТК-Smart, що в зумовлює актуальність розвитку методів аналізу стаціонарних режимів роботи ЕТК-Smart, зокрема, в аналітичній формі, що, в свою чергу, має стати основою не тільки розробки, але й оцінки ефективного функціонування ЕТК-Smart.

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». Дисертаційне дослідження виконувалось згідно з планом наукових робіт кафедри електропостачання КПІ 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» (№ державної реєстрації 0115U002514) та «Розроблення науково-методологічних основ агрегування та керування віртуальними електростанціями і активними споживачами в умовах енергоринку» (№ державної реєстрації 0117U004285).

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є розвиток

методів аналізу стаціонарних режимів в аналітичній формі навантажень ЕТК-Smart децентралізованого електроживлення як елементів Smart-технологій.

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

- проаналізувати особливості розвитку ЕТК-Smart як локальних систем Microgrid;
- побудувати узагальнені моделі роботи ЕТК-Smart як системи з циклічно змінюваними параметрами;
- побудувати зображення складних періодичних функцій напруги еквівалентних генераторів для модульованих сигналів у разі різних видів модуляції;
- побудувати зображення і оригінали струмів усталених режимів на навантаженні у разі дії складних функцій напруги еквівалентних генераторів та циклічно змінюваних параметрів навантажень;
- оцінити вплив періодичних кондуктивних завад на усталені режими ЕТК-Smart;
- розробити програмно-алгоритмічне забезпечення аналізу нормальних усталених режимів ЕТК-Smart, а також спотворених режимів за наявності періодичних кондуктивних завад;
- імплементувати розроблене програмно-алгоритмічне забезпечення в комплексний алгоритм електротехнічного обстеження (енергоаудиту) різних типів ЕТК-Smart та концепцію побудови і модернізації (оптимізації) Smart-технологій на базі ЕТК-Smart для інтелектуального міста.

Об'єкт дослідження: електромагнітні процеси та режими роботи ЕТК-Smart децентралізованого електроживлення.

Предмет дослідження: усталені режими роботи ЕТК-Smart децентралізованого електроживлення, вплив імпульсних кондуктивних періодичних завад.

Методи дослідження: науково-методичну основу виконаних досліджень склали такі методи: системного аналізу, математичного моделювання, перетворення Лапласа, аналітичні методи аналізу, метод окремих складових для аналізу усталених режимів у колах з ключовими елементами. Дослідження виконано за допомогою програмного забезпечення MatCAD та MathLAB.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Вперше отримано функціональні залежності для складних та модульованих функцій напруги (струму), які описують процеси в силовій частині ЕТК-Smart, шляхом застосування періодизації окремих складових функцій базовими функціями рівня, прямої пропорційності, синусоїдальними та експоненціальними, теореми запізнювання перетворення Лапласа, зведення нескінченного ряду до замкненого вигляду. Це що дає змогу, на відміну від існуючих підходів, описати усталені електромагнітні процеси в операторній області Лапласа для періодичних складних функцій напруги (струму) у замкненій формі.

2. Розроблено методологію оцінки парціального впливу періодичних

кондуктивних завад на усталені режими ЕТК-Smart з використанням методу накладання під час аналізу усталених електромагнітних процесів у ЕТК-Smart, яка, на відміну від існуючих підходів, дає змогу підвищити ефективність роботи ЕТК-Smart та отримати аналітичні вирази для опису протікання електромагнітних процесів у разі дії двох еквівалентних генераторів з кратними та некрatними періодами їхньої вихідної напруги.

3. Розроблено методичне забезпечення оцінки енергоефективності локальних електротехнічних комплексів (Microgrid) як елементів інтелектуальних систем електроживлення, з урахуванням розробленої методології аналізу в аналітичному вигляді стаціонарних режимів роботи ЕТК-Smart, що дало змогу розробити концепцію оцінки режимів роботи та модернізації ЕТК-Smart для Smart City, здійснити експрес-аналіз у випадку проведення електротехнічного обстеження (енергоаудиту) таких електротехнічних комплексів за єдиного методологічного підходу до розгляду локальних систем електроживлення, що працюють на змінному, постійному чи постійно/змінному струмі.

4. Удосконалено метод окремих складових аналізу усталених режимів для систем змінної структури у разі розрахунку в аналітичній формі усталених режимів для струму (напруги) в ЕТК-Smart за рахунок побудови зображень Лапласа для складних періодичних функцій напруги за умов нестаціонарності навантажень та застосування комбінацій базових функцій з використанням їх чергування та пауз, що дає змогу аналізувати режими роботи групи навантажень щодо їхнього узгодженого / неузгодженого включення, оцінити можливості зміщення моментів включення, оптимізації графіків відбору потужності (графіків навантажень), а також оцінити рівні узгодженості керування змінними навантаженнями та генераторами.

Практичне значення одержаних результатів полягає у такому:

- розроблене спеціалізоване програмно-алгоритмічне забезпечення дає змогу аналізувати роботу групи навантажень щодо їх узгодженого / неузгодженого включення, оцінити можливості зміщення моментів включення, оптимізації графіків відбору потужності (графіків навантажень), а також оцінити парціальний вплив періодичних кондуктивних завад на усталені режими ЕТК-Smart у процесі дії двох еквівалентних генераторів з кратними та некрatними періодами дії цих генераторів;

- створене методологічне та програмне забезпечення аналізу стаціонарних режимів роботи ЕТК-Smart використано у випадку розробки та практичного застосування методичного забезпечення електротехнічного обстеження (енергоаудиту) ЕТК-Smart та у концепції формування (побудови) та модернізації оптимізації елементів Smart-технологій для Smart City. Побудова аналітичних виразів для миттєвих значень струму та побудова відповідних інтегральних показників (характеристики) в аналітичному вигляді дає можливість здійснювати експрес-аналіз у разі проведення електротехнічного обстеження (енергоаудиту) виділених типів електротехнічних комплексів. У цьому випадку буде забезпечуватися єдиний методологічний підхід до розгляду

локальних систем, що працюють на змінному, постійному чи постійно/змінному струмі;

– розроблене методичне та програмно-алгоритмічне забезпечення аналізу стаціонарних режимів роботи в ЕТК-Smart використовується у разі проведення електротехнологічного обстеження для підприємств, зокрема, в Чернігівському тролейбусному управлінні (м. Чернігів), ТОВ «Електросфера» (м. Київ), ТОВ «Інтерпроект Гмбх» (м. Київ);

– результати теоретичних та практичних досліджень впроваджено у навчальний процес КПІ ім. Ігоря Сікорського як лекційні матеріали для викладання дисциплін «Промислова електроніка», «Силова електроніка в системах електропостачання», «Системи силової електроніки та засоби керування в електроенергетиці», програмно-алгоритмічного забезпечення та методичних вказівок «Основи силової електроніки в електроенергетиці. Основи роботи в MATLAB Simulink».

Апробація результатів дисертації. Основні положення роботи та її результати доповідались, обговорювались та були схвалені на таких міжнародних науково-технічних конференціях: I та II Міжнародних науково-технічних конференціях «Енергетика. Екологія. Людина» (м. Київ, 2009, 2011 рр.), IV Международной конференции «Электромеханические преобразователи энергии» (г. Томск, 2009 г.), IV Міжнародній науково-практичній конференції «Електромагнітна сумісність і безпека на залізничному транспорті» (сmt. Чинадієво, Закарпатська обл., 2011 р.), IX та X Міжнародних науково-технічних конференціях «Проблеми сучасної електротехніки» (м. Київ, 2006, 2008 рр.), II Міжнародній науково-практичній конференції «Інтелектуальні енергетичні системи – ІЕС (ESS'11), Міжнародній науково-технічній конференції «Електричні мережі: сучасні проблеми моніторингу та керування – 2012», 2–5 жовтня 2012 р., с. Жденієве, Закарпатська обл., Міжнародній науково-практичній конференції «Електрифікація транспорту «Транселектро – 2017». Дніпро, 20 – 21 грудня 2018.

Публікації. Основні результати теоретичних та експериментальних досліджень викладено в 22 наукових працях, з яких 2 монографії, 13 статей – у наукових фахових виданнях України, з них 2 статті у виданнях країн ЄС; 1 – свідоцтво про авторське право на науковий твір, 4 – тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій, 1 – методичні вказівки.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел з 164 найменувань і 5 додатків. Загальний обсяг роботи становить 222 сторінки, у тому числі 165 сторінок основного тексту, 18 таблиць, 47 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 дисертаційної роботи за результатами досліджень розвитку та особливостей роботи ЕТК-Smart сформульовано визначення: *«Електротехнічний Smart-комплекс»* (ЕТК-Smart) – це взаємопов’язаний комплекс сучасного електротехнічного та електротехнологічного обладнання, що працює на змінному чи постійному струмі відповідно до вимог концепції Smart Grid, характеризується наявністю різноманітних циклічно змінних параметрів елементів (режимів роботи) та відповідно до своїх режимів функціонування може живитися як від централізованих, так і від децентралізованих джерел електроенергії.

Проведено огляд сучасних тенденцій розвитку нових технологій локального електроживлення, у тому числі ЕТК-Smart, зростання частки електрифікованої критичної інфраструктури, проаналізовано основні тенденції розширення функціональних можливостей електротехнічних комплексів з використанням Smart-технологій у разі живлення різних типів навантажень на змінному та постійному струмі в рамках концепції Smart Grid та Smart City.

Збільшення рівня урбанізації і особливо зростання великих міст зумовлюють зростання споживання електроенергії, розширення та ускладнення електромереж, а також появу низки нових викликів, зокрема нестача генеруючих потужностей, розподільних мереж на рівні 110 – 220 кВ для постачання до районів великих міст, ненадійність місцевих електропостачань споживачів розподільних мереж 6 (10) і 0,4 кВ, нестійкість роботи систем генерації, передачі, розподілу електроенергії, відсутність ефективного балансування генерації та споживання електроенергії, особливо у розрізі доби, а також неефективне формування тарифів, що не сприяють керуванню споживанням та впровадженню інноваційних технологій.

Загалом можна виділити такі ключові чинники, що спричиняють значний вплив на зміни структури електроенергетичної системи і водночас сприяють кластеризації електромереж та розвитку електротехнічних комплексів:

- 1) значне здешевлення засобів локальної електрогенерації, насамперед альтернативних джерел енергії (сонячні батареї, вітрові установки);
- 2) поява активного споживача (просьюмера), коли власник засобів локальної електрогенерації є одночасно і споживачем електроенергії, у тому числі з централізованої мережі, і є як її постачальник;
- 3) поява технологій накопичення та зберігання електроенергії у локальних масштабах (традиційно такі функції відігравали лише гідроакумуючі електростанції (ГАЕС) промислових масштабів) відбувається поширення стаціонарних акумуляторів на рівні домогосподарств та технології взаємодії електромобілів з мережею за технологією Vehicle to Grid (V2G);
- 4) поширення технологій керування споживанням на боці споживача, формування програм споживання, визначення пріоритетних та критичних споживачів електроенергії;

5) поява технологій інтелектуального керування мережею, які забезпечують безпеку, надійність та ефективність функціонування електротехнічних комплексів, а також реалізацію програм поведінки просьюмера на енергоринку.

Серед ключових задач запровадження модернізації електроенергетичної системи шляхом впровадження локальних енергосистем Microgrid та розумних мереж Smart Grid вважаються такі:

1) забезпечення надійності енергопостачання за рахунок оперативного перемикавання споживачів між загальною енергосистемою і місцевими джерелами енергії у випадку перевантажень та стрибків напруги;

2) забезпечення визначених параметрів якості електроенергії шляхом підтримки постійної напруги і скорочення різких перепадів;

3) скорочення використання електроенергії, отриманої шляхом спалювання викопного палива, завдяки застосуванню ВДЕ;

4) оптимізація режиму енергоспоживання централізованої електромережі шляхом згладжування пікових навантажень;

5) застосування економічних стимулів оптимізації режиму роботи локальних енергосистем через диференційовані тарифи централізованої електромережі;

б) збільшення приватних інвестицій у розвиток енергомережі, зокрема у відновлювані джерела енергії, засоби її накопичення і зберігання, а також у підвищення інформаційної складової енергосистеми.

Ключовою технологією, що забезпечує інтеграцію різних типів генерації електроенергії, зокрема, ВДЕ, пристроїв накопичення та збереження енергії, реалізацію вимог різних типів сподивачів електроенергії для різних класів ЕТК-Smart є силова електроніка.

На рівні загальної архітектури електроенергетики відбуваються структурні зміни. Кінцевим користувачем енергетичної системи стає просьюмер – активний споживач, який не тільки використовує, а й виробляє енергію. Через адаптивні цифрові мережі просьюмер вступає в «партнерство» з навколишнім середовищем, будь то єдина енергетична система країни, енергосистема міста або сусіднє домогосподарство. Монетизується енергообмін за допомогою цифрової платформи, що дає змогу конструювати сервіси і без посередників здійснювати мікроінвестиції. Так навколо просьюмера формується інтернет енергії – екосистема виробників і споживачів енергії, які безперешкодно інтегруються в загальну інфраструктуру і обмінюються енергією.

За результатами проведеного аналізу можемо сформулювати такі причини різної модульованої зміни параметрів навантажень та генераторів, а у більш широкому сенсі – модульованої зміни параметрів елементів у виділених електротехнічних комплексах:

– робота у складі комплексів ВДЕ, у першу чергу генерація енергії сонячними панелями;

– зміна кількості електромобілів, які підключаються до заряджаючих пристроїв швидкого заряджання;

- паралельна робота пристроїв силової електроніки (ШПІ, випрямлячів, інверторів, бітиристорних регуляторів). Їх режими відбору струму від системи можуть накладатися;
- робота електричних приладів у будинках, комерційних та бюджетних будівлях, режими яких також можуть накладатися;
- наявність високочастотних ударних технологій;
- крокові механізми, крокові двигуни;
- джерела вторинного живлення, наприклад, на основі ШПІ;
- паралельна робота в періодичних режимах «включено / виключено» низки навантажень (наприклад, холодильників, імпульсних навантажень);
- складні (складені) навантаження з імпульсним відбором потужності;
- комплекси з кроковими датчиками;
- електротехнології з переривчастим відбором струму різної форми;
- генерація та поширення кондуктивних завад, оцінка їхнього впливу на критичні елементи системи.

Таблиця 1 – Трансформація сегментів галузі електроенергетики з точки зору розвитку ЕТК-Smart

Аспект змін	Сегменти кола цінностей			
	Виробництво енергії, генерація	Передача, трансформація	Розподілення	Кінцеві споживачі
Технологічні тренди	<ul style="list-style-type: none"> - Віртуальні електростанції - Зростання ефективності та поширення генерації за рахунок відновлювальних джерел енергії 	<ul style="list-style-type: none"> - Технології високої напруги - Передові системи перетворення та передачі електроенергії (HVDC, FACTS) - Високотужні провідники та високотемпературні кабелі 	<ul style="list-style-type: none"> - Моніторинг LVмереж / системи автоматизації підстанцій - Розподілені системи керування енергетичними ресурсами - Системи акумулювання енергії, в т.ч. електромобілів - Розвиток систем Microgrid 	<ul style="list-style-type: none"> - Керування попитом - Передова інфраструктура обліку - Енергоефективна інфраструктура для розумного будинку
Трансформація бізнеса	<ul style="list-style-type: none"> - Зростаючі вимоги до ефективності та екологічності 	<ul style="list-style-type: none"> - Інтеграція ринків збуту (транскордонний обмін – панєвропейський ринок, міжрегіональні ринки США) 	<ul style="list-style-type: none"> - Зміна бізнес-ролі операторів мереж - Комплексне інтелектуальне керування попитом та споживанням 	<ul style="list-style-type: none"> - Споживачі електроенергії стають виробниками (продаж надлишків енергії)
Ефекти	<ul style="list-style-type: none"> - Додаткові потужності - Забезпечення енергією віддалених ізольованих регіонів 	<ul style="list-style-type: none"> - Зниження втрат 	<ul style="list-style-type: none"> - Зниження пікових навантажень мережі - Зниження операційних витрат - Зниження втрат 	<ul style="list-style-type: none"> - Точний облік споживання

У другому розділі проаналізовано основні принципи моделювання ЕТК-Smart шляхом виокремлення еквівалентних генераторів, перетворювачів електроенергії та навантажень, а також розглянуто особливості роботи сучасних електротехнічних комплексів з циклічно змінюваними параметрами шляхом врахування змін параметрів еквівалентних генераторів та еквівалентних

навантажень.

Аналіз перехідних режимів в ЕТК-Smart вимагає використання динамічних характеристик нелінійних елементів, які, у свою чергу, залежать від динамічних процесів, що відбуваються в них, і, отже, у загальному випадку наперед невідомі. Розрахунок процесів в ЕТК-Smart, як систем зі змінною структурою та параметрами елементів, зводиться до розрахунку квазіусталеного процесу.

Вибір методу аналізу ЕКТ визначається структурою та характеристиками використаних моделей, елементів, які можуть бути лінійними, нелінійними та параметричними. На кожному інтервалі сталості структури (ІСС) електромагнітні процеси описуються системою рівнянь змінних стану:

$$dx_i(t)/dt = A_i x_i(t) + B_i f(t), i = 1, \dots, m; \quad (1)$$

$$y(t) = C_i x_i(t) + D_i f(t), i = 1, \dots, m, \quad (2)$$

де $X(t)$ – вектор змінних стану, елементами якого є струми індуктивностей i_L та напруги ємностей u_C ; $y(t)$ – вектор вихідних змінних; $X = dX(t)/dt$; A_i, B_i, C_i, D_i – матричні коефіцієнти, i – номер інтервала сталості структури, $i = [1, m]$, m – кількість інтервалів сталості структури.

Якщо для функцій зміни напруги генератора $U_G(t)$ чи навантаження $U_H(t)$ на періоді T_T ввести базові функції $f_{B,G}(t)$ та $f_{B,H}(t)$ (синусоїдальну, постійно ступінчасту, експоненціальну тощо), а пасивним R -, L -, C -елементам поставити у відповідність базові константи R_0 , L_0 , C_0 , то можна записати співвідношення

$$u_G(t) = \cup_j [u_{G,j}(t) | t \in [0, t_{G,i}], j = 1, \dots, n_{G,M}] = u_G(t, U_{M,G}, f_{B,G}(t), f_{G,M}(t, \Pi_{G,M}, \omega_{G,M})); \quad (3)$$

$$u_H(t) = \cup_j [u_{H,j}(t) | t \in [0, t_{H,i}], j = 1, \dots, n_{H,M}] = u_H(t, U_{M,H}, f_{B,H}(t), f_{H,M}(t, \Pi_{H,M}, \omega_{H,M})); \quad (4)$$

$$R(t) = R(t, R_0, f_{R,M}(t, \Pi_{R,M}, \omega_{R,M})); \quad (5)$$

$$L(t) = L(t, L_0, f_{L,M}(t, \Pi_{L,M}, \omega_{L,M})); \quad (6)$$

$$C(t) = C(t, C_0, f_{C,M}(t, \Pi_{C,M}, \omega_{C,M})), \quad (7)$$

де $f_{G,M}(t, \Pi_{G,M}, \omega_{G,M})$ та $f_{H,M}(t, \Pi_{H,M}, \omega_{H,M})$ – функції, промодульовані відповідною функцією модуляції, $\Pi_{G,M}$ та $\Pi_{H,M}$ – множина параметрів модуляції для генератора та навантаження, $\omega_{G,M}$ та $\omega_{H,M}$ – частота модуляції для генератора та навантаження.

Перевагою аналітичних методів, зокрема, методу окремих складових, є можливість отримання результатів розрахунку в замкненому вигляді та відсутності необхідності визначення початкових умов у разі переходу від одного інтервалу безперервності діючої напруги еквівалентного генератора до іншого, а також можливість побудови аналітичних залежностей для інтегральних характеристик, що важливо для оцінки енергоефективності роботи ЕТК-Smart в цілому.

Необхідність використання цього методу обумовлена такими причинами. По-перше, за розрахунку процесів методом припасовування в точках розриву діючих функцій необхідно визначати початкові умови для проведення

розрахунків на кожному наступному інтервалі безперервності. По-друге, за розрахунку процесів в аналітичному вигляді з використанням звичайної методики перетворення Лапласа розв'язок отримуємо у вигляді нескінченного ряду Фур'є, що ускладнює подальші розрахунки інтегральних характеристик.

Математична модель еквівалентної схеми є рівнянням (1), застосовуючи до нього пряме перетворення Лапласа, отримаємо рівняння

$$Z(p)I(p) = E(p), \quad (8)$$

де $Z(p) = \sum_k a_k p^k$; $p = d/dt$; $E(p)$ – зображення кусково-неперервної періодичної функції, розв'язуючи яке, знаходимо операторне зображення реакції кола на прикладений вплив $I(p) = E(p)/Z(p)$, де $Z(p)$ – операторний опір навантаження.

Зазвичай у разі відомої функції зміни вхідної напруги за допомогою ПЕЕ у сформованих моделях «генератор» – «перетворювач електричної енергії» – «навантаження» (система $\{Г\} - \{ПЕЕ\} - \{Н\}$) можна перейти до більш спрощеної моделі «еквівалентний генератор» – «еквівалентне навантаження» (система $\{Г\} - \{Н\}$, рис.2), де періоди роботи елементів множин генераторів $\{Г\}$ та навантажень $\{Н\}$ дорівнюють відповідно $T_Г$, та $T_Н$. У табл. 2 систематизовано можливі співвідношення між періодом $T_Т$ та періодами $T_Г$ і $T_Н$ роботи для виділених елементів системи. Кожне таке співвідношення характеризує типи режимів за № 1–5 роботи системи $\{Г\} - \{Н\}$, позначення та застереження аналогічні до табл. 2.

Таблиця 2 – Режимы работы системы $\{Г\} - \{Н\}$

Номер режиму	Значення коефіцієнтів повторюваності періоду		Визначення періоду $T_Т$
	$n_Г$	$n_Н$	
1	1	1	$T_Г = T_Н = T_Т$
2	$n_Г$	1	$n_Г T_Г = T_Н = T_Т$
3	1	$n_Н$	$T_Г = n_Н T_Н = T_Т$
4	$n_Г$	$n_Н$	$n_Г T_Г = n_Н T_Н = T_Т$
5	$n_Г$	$n_Н$	$n_Г T_Г \approx T_Т; n_Н T_Н \approx T_Т (n_Г, n_Н \notin N)$

Для режиму 4, який є найбільш узагальненим, $n_Г > 1$, $n_Н > 1$, $n_Г T_Г = n_Н T_Н = n_{НСК}(n_Г, n_Н) T$ ($n_{НСК}$ – найменше спільне кратне). Для нього характерні всі особливості попередніх режимів: можливість циклічної зміни функції генератора $f_{(j)}(t)$, циклічної зміни матричних коефіцієнтів A , B , C , D . Наведемо вирази для $x_i(t)$, $y(t)$:

$$dx_i(t)/dt = A_{(j)i} x_i(t) + B_{(j)i} f_{(j)}(t); i = 1, \dots, m_j; j = 1, \dots, n_{НСК,М}(n_Г, n_Н); \quad (9)$$

$$y(t) = C_{(j)i} x_i(t) + D_{(j)i} f_j(t); i = 1, \dots, m_j; j = 1, \dots, n_{НСК,М}(n_Г, n_Н), \quad (10)$$

У третьому розділі отримано аналітичні вирази зображень та оригіналів напруг і струмів у ЕТК-Smart з циклічно змінюваними параметрами з використанням методу окремих складових для складних періодичних функцій

напруги, в основі яких лежать відповідні базові функції рівня, синусоїди, експоненти та функції прямої пропорційності, з використанням теореми запізнювання $f(t-t_0) \doteq e^{-pt_0} F(p)$ та згортки нескінченних аналітичних виразів в операторній області, що наведено у табл. 3.

Оригінал струму на інтервалі знаходиться як різниця перехідного $i_{p,i}(t)$ (що є результатом роботи генератора на інтервалі, який розраховується) та вільного (що є результатом роботи генераторів на всіх інших інтервалах, крім того, який розраховується) $i_{v,i}(t)$ струмів: $i_i(t) = i_{p,i}(t) - i_{v,i}(t)$.

Розрахунок вільних струмів для базової функції напруги рівня:

$$i_{v,i}(t) = -\frac{e^{-\alpha_i t}}{1 - e^{-\sum_{k=1}^n \alpha_i \tau_i}} \cdot \left[I_{i-1+n} (1 - e^{-\alpha_{i-1+n} \tau_{i-1+n}}) + \sum_{j=2}^n \left(I_{i-j+n} (1 - e^{-\alpha_{i-j+n} \tau_{i-j+n}}) e^{-\sum_{s=1}^{j-1} (\alpha_{i-s+n} \tau_{i-s+n})} \right) \right]. \quad (11)$$

Розрахунок перехідних струмів для базової функції напруги рівня:

$$i_{p,i}(t) = \text{Res} \frac{U_i}{p(R_i + pL)} e^{pT} \Big|_{p_1=0} + \text{Res} \frac{U_i}{p(R_i + pL)} e^{pT} \Big|_{p_2=-\sigma_i} = \frac{U_i}{R_i} (1 - e^{-\sigma_i t}). \quad (12)$$

Аналогічно шляхом знаходження оригіналів вільних та перехідних струмів відповідно їх зображень розраховуються випадки для інших базових функцій.

Таблиця 3 – Зображення в операторній області окремих функцій

№	Назва	Рисунок	Зображення
1	Функція рівня $f_i(t) = A$		$F_{\Pi}(p) = \frac{1}{p} \frac{(1 - e^{-pT})}{(1 - e^{-pT_n})} \times \sum_{i=1}^n A_i e^{-(i-1)pT}$
2	Двополярна синусоїда $f_i = A_i \sin \omega t$;		$F_{\Pi}(p) = \frac{\omega}{p^2 + \omega^2} \frac{(1 - e^{-pT})}{(1 - e^{-pT_n})} \times \sum_{i=1}^n A_i e^{-(i-1)pT}$
3	Двостороння пило- подібна функція $f_i = \frac{A_i}{T} t$; $t \in [0; T/2)$ $f_i = -\frac{A_i}{T} t + 2A_i$ $t \in [T/2; T)$		$F_{\Pi}(p) = \frac{2}{Tp^2} (1 - 2e^{-pT} + e^{-2pT}) \times \frac{1}{(1 - e^{-pT_n})} \sum_{i=1}^n A_i e^{-(i-1)pT}$

Окрім того, використання такого підходу дозволяє здійснювати аналіз електромагнітних процесів у ЕТК-Smart, де застосовуються різні випадки імпульсної модуляції: амплітудно-імпульсну модуляцію (АІМ), частотно-імпульсну модуляцію (ЧІМ), широтно-імпульсну модуляцію (ШІМ) та фазово-імпульсну модуляцію (ФІМ).

Зокрема, для АІМ (вигляд функції генератора для $T_{II} = 7T$ наведено на рис. 1) зображення сигналу генератора має такий вигляд:

$$F(p) = \frac{1}{p} \frac{(1 - e^{-pT})}{(1 - e^{-pT_n})} \sum_{i=1}^n f_m((i-0,5)T) e^{-2(i-1)pT} \quad (13)$$

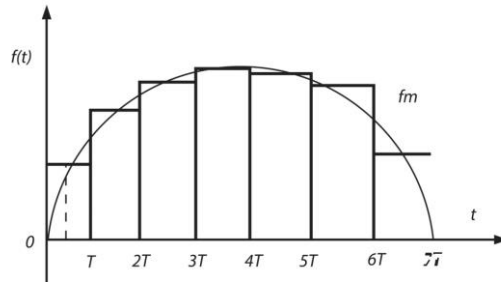


Рисунок 1 – Вигляд сигналу генератора з АІМ, у разі $T_{II} = 7T$.

Для ЧІМ вигляд зображення сигналу генератора буде

$$F(p) = A \frac{1}{p} \frac{(1 - e^{-pT})}{(1 - e^{-pT_n})} \sum_{i=1}^n e^{-pT_{i-1}} \quad (14)$$

де T_{i-1} – пауза між $i-1$ -м та i -м імпульсами, для ФІМ

$$F(p) = A \frac{1}{p} \frac{(1 - e^{-pT})}{(1 - e^{-pT_n})} \sum_{i=1}^n (e^{T_{en}-T-T_{i-1}} + e^{-pT_i}), \quad (15)$$

де $T_{en} = const$ – сумарний час імпульсу та паузи, $T_0 = 0$.

Здійснення аналізу електромагнітних процесів у ЕТК-Smart із змінюваними параметрами для складних періодичних функцій включає:

- 1) побудову графіків або таблиць залежностей циклічних змін параметрів електричного кола від часу, у однаковому масштабі, визначення функцій генератора $U_{\Gamma}(t)$ та навантаження $Z(t)$;
- 2) побудову зображень функцій генератора $U(p)$ та навантаження $Z(p)$ за допомогою перетворень Лапласа: $U(p) = L\{U_{\Gamma}(t)\}$, $Z(p) = L\{Z(t)\}$;
- 3) побудову зображень функцій струмів відповідно до закону Ома в операторній формі: $I(p) = U(p) / Z(p)$;
- 4) знаходження оригіналів струмів за допомогою оберненого перетворення Лапласа $i(t) = L^{-1}\{I(p)\}$.

Розглянемо приклад розрахунку струму для випадку прямокутного сигналу генератора (рис. 2,а), при $T_{\Gamma} = 8T_0$ та змінному навантаженні, при зменшенні активного опору на півперіоді роботи схеми ($R_{1,5} = 60$ Ом, $R_{2,6} = 50$ Ом, $R_{3,7} = 30$ Ом, $R_{4,8} = 20$ Ом).

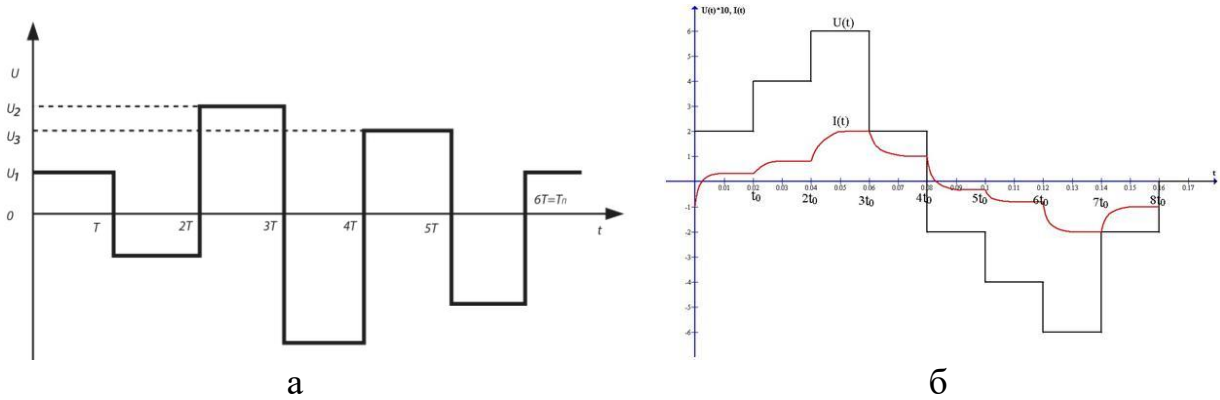


Рисунок 2 – Напруга та струм для випадку прямокутного сигналу генератора

У четвертому розділі проаналізовано особливості аналізу ЕТК-Smart з нелінійними елементами, отримано аналітичні вирази для розрахунку інтегральних характеристик, зокрема, середніх та діючих струмів для різних видів базових функцій діючих сигналів генераторів, а також проведено аналіз можливостей застосування отриманих аналітичних виразів для струмів у ЕТК-Smart з циклічно змінюваними параметрами елементів у разі дії періодичних кондуктивних завад різної форми (прямокутної, синусоїдальної та трикутної).

Випадок аналізу завади з прямокутною формою напруги $U(t)$ для різних значень опору наведено на рис.3.

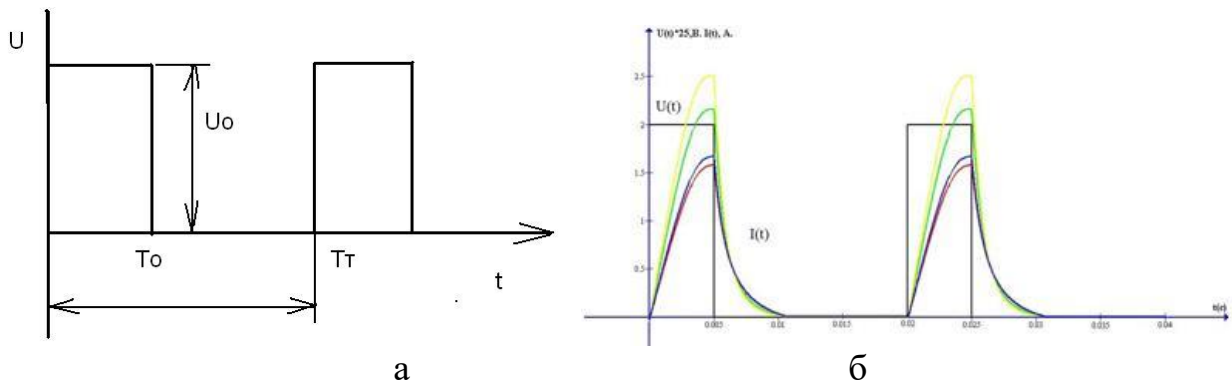


Рисунок 3 – Випадок завади з прямокутною формою напруги $U(t)$

Для розробки алгоритму оцінки дії періодичних завад на змінному струмі використано метод накладання з поєднанням методу розщеплення сигналів (представлення функції еквівалентного генератора дією кількох генераторів).

Алгоритм оцінки дії періодичних завад на змінному струмі містить наступні кроки:

1. Ідентифікація наявності періодичних завад $U_3(t)$ у лінії змінного струму;
2. Ідентифікація параметрів періодичної функції завади $U_3(t)$, наприклад, амплітуди U_{M3} , частоти f_3 у разі дії синусоїдальної завади;
3. Ідентифікація параметрів реактивних елементів, наприклад, індуктивності L_3 , які можуть додатково «індукуватися» (викликатися) дією завади на частоті f_3 в лінії змінного струму. Можливі ситуації, коли значення, наприклад, індуктивності, таких «індукованих» реактивних елементів будуть нульові або такі малі за величиною, що ними можна знехтувати ($L_3 = 0$).
4. Розрахунок струму $i_3(t)$ в лінії змінного струму з параметрами R_L та L ($L =$

$L_{\text{Л}} + L_3$) у разі дії періодичної завади $U_3(t)$;

5. Розрахунок діючого та максимального значень струму для функції $i_3(t)$ на періоді $T_3 = 1 / f_3$.

6. Аналіз додаткових (привнесених) втрат енергії в лінії змінного струму на активному елементі $R_{\text{Л}}$ у разі дії завади періодичної форми $U_3(t)$:

– потужність втрат на активному елементі лінії у разі дії завади:

$$P_3 = R_{\text{Л}} \cdot I_{3\text{д}}^2;$$

– втрати енергії від дії завади на виділеному інтервалі часу $T_{\text{Т}}$:

$$W_{\text{д,Т}} = P_3 \cdot T_{\text{Т}};$$

7. Розрахунок максимальної накопиченої електромагнітної енергії на реактивному елементі L у разі дії завади: $W_{L3} = L \cdot I_{3\text{М}}^2 / 2$, де $I_{3\text{М}}$ – максимальне значення струму у лінії, обумовленого дією періодичних завад;

8. Оцінка впливу завад на електромагнітні процеси в лінії змінного струму. Можна здійснити на основі аналізу коефіцієнтів: $K_{31} = P_3 / Q_3$; $K_{32} = (P_3 \cdot f_{\text{М}}) / (P_{\text{АС}} \cdot f_3)$,

де $P_{\text{АС}}$ – потужність втрат у лінії у разі дії змінної напруги.

За цим же алгоритмом можна оцінити сумарний вплив одночасної дії кількох завад, а також парціальний внесок у загальне спотворення дії окремої завади. Схожим чином, у дещо спрощеному вигляді, діє алгоритм оцінки дії періодичних завад на постійному струмі.

Аналітичний вигляд виразів струму навантаження дає змогу розрахувати інтегральні характеристики, зокрема середній та діючий струми.

На рис. 4. наведено сімейства характеристик, що описують залежність діючого значення струму від частоти надходження імпульсів завад та їхньої амплітуди за синусоїдальної форми сигналу.

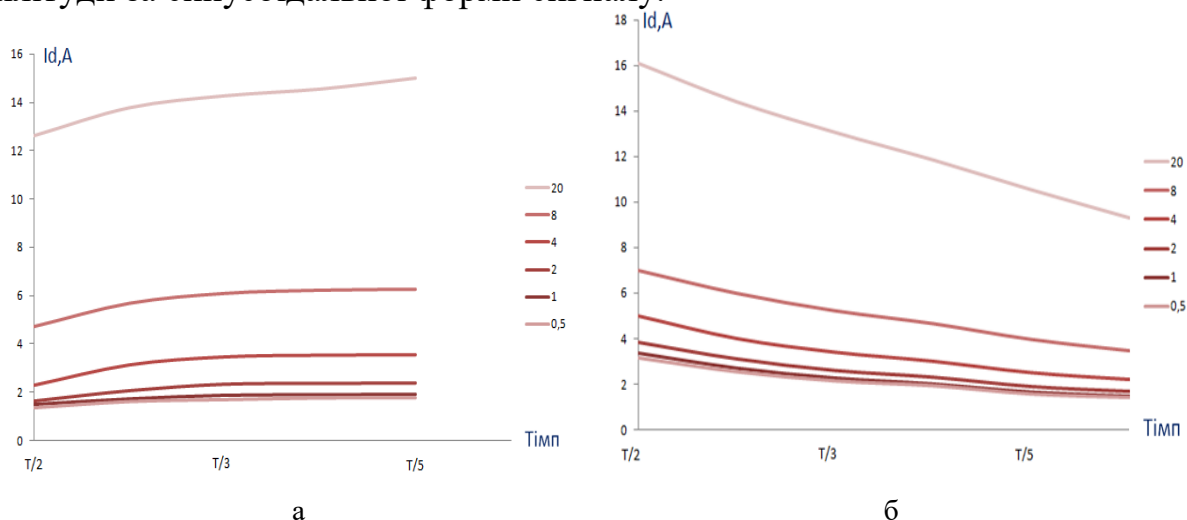


Рисунок 4 – Залежність діючого значення струму від періоду імпульсів ($T_{\text{имп}}$) за синусоїдальної форми сигналу (при амплітуді напруги 0,5; 1; 2; 4; 8; 20 В)

У п'ятому розділі розглянуто особливості побудови та застосування розробленого програмно-алгоритмічного забезпечення для розрахунку усталених режимів в ЕТК-Smart на основі розвитку методу окремих складових. Так, на основі послідовності етапів розрахунку розроблено узагальнений алгоритм, блок-схема якого наведена на рис. 5.

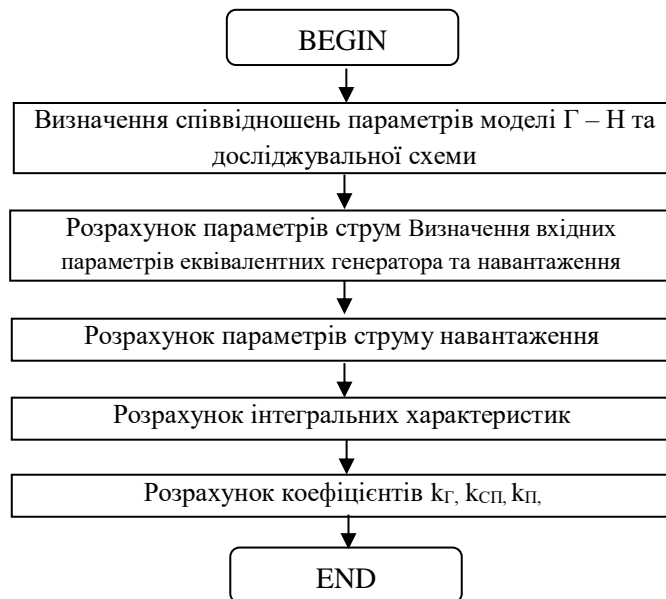


Рисунок 5 – Блок-схема алгоритму розрахунку ustalених режимів в ЕТК-Smart

В результаті запропоновано алгоритм електротехнічного обстеження (енергоаудиту) електротехнічних комплексів шляхом використання запропонованої методології аналізу ustalених режимів та узагальненого алгоритму розрахунку електромагнітних процесів у ЕТК-Smart, який включає наступні етапи.

1. Загальна оцінка виділеного для розгляду електротехнічного комплексу (Microgrid).
2. Виділення значимих та незначимих електромагнітних процесів.
3. Визначення контрольованих перетинів у структурній схемі Microgrid, тобто перетинів, де здійснюється аналіз.
4. Для кожного i -го виділеного перетину Π_i із множини контрольованих перетинів $\{\Pi_i\}$ визначення форми еквівалентного генератора напруги $E_{EKB}(t)$ та еквівалентного навантаження $Z_{EKB}(t)$.
5. Ідентифікація параметрів еквівалентного генератора напруги $E_{EKB}(t)$ та еквівалентного навантаження $Z_{EKB}(t)$; здійснення за необхідності апроксимації функцій $E_{EKB}(t)$ та $Z_{EKB}(t)$ сумою базових функцій (синусоїдальні, експоненціальні, кусково-лінійні функції).
6. Побудова моделі електромагнітного процесу, тобто формування системи рівнянь, які описують процеси у i -го виділеного перетину.
7. Розрахунок струму $i(t)$ в аналітичному вигляді – побудова аналітичного розв'язку за допомогою розробленого алгоритмічно-програмного забезпечення аналізу.
8. Оцінка нормальних, граничних та екстремальних режимів роботи електротехнічних комплексів у виділених контрольованих перетинах.
9. Оцінка інтегральних характеристик (показників) функціонування еквівалентного генератора $E_{EKB}(t)$ та еквівалентного навантаження $Z_{EKB}(t)$ для i -го виділеного контрольованого перетину.
10. Оцінка рівня енергоефективності функціонування Microgrid в цілому.

11. За необхідності розробка та видача рекомендацій щодо оптимізації (зміни) параметрів, режимів та структури електротехнічного комплексу.

12. Підготовка узагальнених висновків.

Також запропоновано концепцію побудови та модернізації, у тому числі й для оптимізації режимів роботи, елементів ЕТК-Smart для Smart-технологій інтелектуального міста, зокрема, для вибору оптимальних параметрів Microgrid та оцінки загальних показників енергоефективності функціонування інтелектуального міста.

Таблиця 4 – Впровадження результатів дисертаційного дослідження

№ з/п	Назва проекту, організації	Що впроваджено
1	Проект USAID «Розробка та обґрунтування плану розвитку та шляхів підвищення ефективності громадського електротранспорту у м. Чернігів», 2017	Оцінка втрат внаслідок дії періодичних завад у електромережі тягових підстанцій Чернігівського тролейбусного управління із застосуванням програмно-алгоритмічного забезпечення аналізу стаціонарних режимів роботи при проведенні електротехнологічного обстеження в Управлінні транспорту, транспортної інфраструктури та зв'язку Чернігівської міської ради
2	ТОВ «Електросфера», м.Київ	Пакет програм, який дає змогу здійснювати розрахунки та аналіз характеристик електротехнічних комплексів, що містять електричні схеми з періодично змінюваними параметрами
3	ТОВ «Інтерпроект Гмбх», м.Київ	Пропозиції щодо підвищення енергоефективності електротехнічних комплексів децентралізованого електроживлення водоканалів, зокрема у віддалених населених пунктах, в умовах нестабільного енергопостачання та у разі використання додаткових джерел енергії, у тому числі сонячних та вітрогенерацийних установок
4	Впровадження у навчальний процес Інституту енергозбереження і енергоменеджменту КПІ ім. Ігоря Сікорського на кафедрі електропостачання	Розширення методу окремих складових на основі перетворень Лапласа для розрахунку електромагнітних процесів у системах з перетворювачами електроенергії з періодично змінюваними параметрами генераторів та навантажень, аналітичні вирази для моделювання та аналізу періодичних процесів у системах з перетворювачами електроенергії з періодично змінюваними параметрами генераторів та навантажень, а також аналізу завад та інтегральних характеристик таких систем
5	Використання у науково-дослідній роботі кафедри електропостачання КПІ ім. Ігоря Сікорського	Методологічне забезпечення розрахунку усталених режимів у системах з перетворювачами електроенергії. Програмно-алгоритмічне забезпечення аналізу стаціонарних режимів роботи ЕТК-Smart у разі дії періодичних завад. Методичне забезпечення здійснення експрес-аналізу у разі проведення електротехнічного обстеження (енергоаудиту) ЕТК-Smart з циклічно змінюваними параметрами генераторів та навантажень.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язана актуальна для електротехнічних комплексів науково-прикладна задача розвитку методу окремих складових для аналізу стаціонарних режимів роботи електротехнічних комплексів у разі дії складних функцій напруги генераторів та циклічно змінюваних параметрів навантажень. Отримані в дисертаційній роботі результати становлять суттєвий внесок у подальший розвиток аналізу електромагнітних процесів у ЕТК-Smart аналітичними методами.

1. На основі аналізу тенденцій розширення функціональних можливостей електротехнічних комплексів у рамках окремих територій (поселень, мікрорайонів, господарських комплексів) з використанням Smart-технологій виявлено основні напрямки впровадження електротехнічних комплексів децентралізованого електроживлення як базових елементів кластерної моделі системи електроживлення з урахуванням можливостей автономної або напівавтономної роботи її окремих сегментів, а також підвищення енергоефективності та стійкості в різних умовах, що дає змогу сформулювати комплексне бачення інтеграції процесів розвитку Microgrid та загальної концепції Smart City.

2. За результатами аналізу основних принципів моделювання електротехнічних комплексів шляхом виокремлення еквівалентних генераторів, перетворювачів електроенергії та навантажень, що дає змогу врахувати співвідношення їхніх періодів роботи між собою та відповідно до загального періоду роботи електротехнічного комплексу, виявлено особливості роботи електротехнічних комплексів з циклічно змінюваними параметрами еквівалентних генераторів та навантажень, що дало змогу сформувати моделі усталених режимів у ЕТК-Smart за допомогою аналітичних методів.

3. Побудовано зображення складних періодичних функцій напруги для модульованих сигналів за різних видів модуляції з використанням методів накладання та згортки нескінченних аналітичних виразів в операторній області, що дало змогу сформувати аналітичні вирази для розрахунку струмів усталених режимів для складних функцій напруги генераторів та циклічно змінюваних параметрів навантажень. Розроблену методологію аналізу доцільно застосовувати у разі аналізу груп навантажень щодо їх узгодженого / неузгодженого включення, оцінки можливості зміщення моментів включення, оптимізації графіків відбору потужності (графіків навантажень) за реалізації механізмів керування попитом (DSM), а також оцінки рівнів узгодженості керування змінними навантаженнями та генераторами, аналізу впливу завад, коли період дії основного сигналу та завади не співпадає.

4. Побудовано аналітичні вирази оригіналів струмів усталених режимів для складних функцій напруги генераторів та циклічно змінюваних параметрів навантажень, що дало змогу сформувати математичну модель для розрахунків та аналізу електромагнітних процесів усталених режимів у ЕТК-Smart.

5. На основі аналізу електромагнітних процесів усталених режимів у ЕТК-Smart здійснено оцінку впливу періодичних кондуктивних завад на усталені

режими в цих електротехнічних комплексах, що дало змогу підвищити ефективність їхньої роботи та отримати аналітичні вирази протікання електромагнітних процесів у разі дії двох еквівалентних генераторів $E_{\text{ЕКВ1}}(t)$ та $E_{\text{ЕКВ2}}(t)$ з некратними періодами роботи.

6. Розроблене програмне забезпечення дало змогу виконати впровадження результатів аналізу нормальних усталених режимів ЕТК-Smart, а також спотворених режимів за наявності періодичних кондуктивних завад у концепції формування (побудови) та модернізації оптимізації елементів Smart-технологій для Smart-мікрорайону інтелектуального міста. Побудова аналітичних виразів для миттєвих значень струму та побудова відповідних інтегральних показників (характеристики) в аналітичному вигляді дає можливість здійснювати експрес-аналіз у разі проведення електротехнічного обстеження (енергоаудиту) виділених типів електротехнічних комплексів. У цьому разі забезпечуватиметься єдиний методологічний підхід до розгляду локальних систем, що працюють на змінному, постійному чи постійно/змінному струмі.

7. Результат досліджень впроваджено у Чернігівському тролейбусному управлінні (м. Чернігів), ТОВ «Електросфера» (м.Київ), ТОВ «Інтерпроект Гмбх» (м. Київ), а також у навчальному процесі Інституту енергозбереження і енергоменеджменту КПІ ім. Ігоря Сікорського.

8. Результати дисертаційної роботи рекомендовано для використання організаціям та підприємствам, іншим науковим та промисловим установам, які займаються аналізом та оптимізацією електромагнітних процесів у електротехнічних комплексах децентралізованого електропостачання.

9. 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. Жуйков В.Я., Денисюк С.П., Мельничук Г.В. Моделювання систем з перетворювачами електроенергії з циклічно-змінюваними параметрами. К.: ТОВ «Наш формат», 2018. 165 с.

2. Denysiuk S., Melnychuk H. Decentralization of city energy supply systems in the conditions of technological transformations and formation of intellectual cities (smart city). *Scientific foundations of modern engineering. Monograph*. Boston (USA), 2020 P.181-204.

3. Мельничук Г.В. Енергоменеджмент населених пунктів та територій на основі інтелектуальних систем керування електроживленням. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. К., 2019. № 4. С.76-86

4. Горенко Д.С., Мельничук Г.В. Оптимізація роботи електрогенеруючих установок при дії джерела імпульсних завад. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. К., 2016. №4. С.72 –80.

5. Мельничук Г.В., Щербань К.Ю., Прокопенко І.Д. Аналіз впливу завад на характер протікання енергетичних процесів у системах з перетворювачами електроенергії. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр.*

Спеціальний випуск. К. 2012. С.145–152.

6. Мельничук Г.В. Особливості моделювання систем електропостачання з розосередженою генерацією. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. Спеціальний випуск. Ч.2. К. 2011. С.191–197.*

7. Денисюк С.П., Мельничук Г.В., Колесник П.С. Аналіз інтегральних характеристик систем електроживлення з циклічно змінними параметрами. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб.наук.пр. К. 2011. №28. С.30–35.*

8. Денисюк С.П., Мельничук Г.В., Колесник П.С. Розрахунок електромагнітних процесів у системах з перетворювачами електричної енергії для технологічних систем з циклічно змінюваними параметрами. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. К. 2010. №25. С.140–144.*

9. Денисюк С.П., Мельничук Г.В. Формування системи рівнянь змінних стану для розрахунку процесів у електричних комплексах з циклічно змінними режимами. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. К. 2005. № 3(12). С. 132–137.*

10. Денисюк С.П., Мельничук Г.В. Побудова перетворення Лапласа при аналізі електромагнітних процесів у комплексах з циклічно змінюваними параметрами. *Електроніка та зв'язок. 2005. № 26. С. 29–36.*

11. Денисюк С.П., Мельничук Г.В. Застосування перетворення Лапласа для аналізу електромагнітних процесів в системах з циклічно змінюваними параметрами елементів. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. К. 2003. № 3(6). С. 102–108.*

12. Денисюк С.П., Мельничук Г.В. Аналіз процесів у перетворювачах електроенергії з циклічно змінюваними параметрами та врахуванням тривалості технологічного процесу. *Техн. електродинаміка. Темат. випуск «Проблеми сучасної електротехніки». Ч.2. 2006. 107–112.*

13. Жуйков В.Я., Денисюк С.П., Мельничук Г.В. Розвиток методу окремих складових для розрахунку складних електронних систем. *Техн. електродинаміка. Темат. випуск «Проблеми сучасної електроніки». 2008. Ч.3. С.3–8.*

14. Melnychuk H. Features of development of Smart Grid networks in communities, modeling methods and challenges in the implementation of intelligent power supply systems. *Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences. VIII (30), Issue: 244, 2020, Dec., Budapest. P. 63–65.*

15. Melnichuk G. Smart grid networks in communities: general approaches and calculation methods for simulation. *Sciences of Europe (Praha, Czech Republic). VOL 1, №58 (2020). P.62–65.*

16. Колесник П.С., Мельничук Г.В. Аналіз періодичних кондуктивних завад в системах електроживлення з пристроями силової електроніки. *В зб. «Матеріали II наук.-техн. конф. ІЕЕ НТУУ «КПІ» «Енергетика. Екологія. Людина». К. 2011. С.394–399.*

17. Денисюк С.П., Колесник П.С., Мельничук Г.В. Аналіз впливу періодичних імпульсних завад на процеси в системі електричного живлення рухомого складу. *В зб. «Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції «Електромагнітна сумісність і безпека на залізничному*

транспорті» (сmt. Чинадієво, 15–19 лютого, 2011 р.).

18. Мельничук Г.В. Особливості використання методів аналізу роботи систем з перетворювачами електричної енергії для оцінки енергоефективності технологічних систем. В зб. *«Матеріали I наук.-техн. конф. ІЕЕ НТУУ «КПІ» «Енергетика. Екологія. Людина»*. К. 2009. С.142–146.

19. Денисюк С.П., Мельничук Г.В. Богдан А.В. Адаптация аналитических методов анализа для повышения эффективности автоматизации проектирования электротехнических комплексов. В сб. *«Материалы IV международной конференции «Электромеханические преобразователи энергии»* (г. Томск, 13–16 октября 2009 г.). С.287-291.

20. 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.

21. Денисюк С.П., Рибій М.В., Мельничук Г.В. А.С. № 100081Україна. Методологія аналізу локальних мереж (Microgrid) постійного струму з циклічно змінними параметрами елементів». Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 100081, дата реєстрації 30.09.2020.

22. Денисюк С.П., Дерев'янка Д.Г., Мельничук Г.В. Системи силової електроніки в електроенергетиці. Основи роботи в MATLAB Simulink. Методичні вказівки до проведення лабораторних робіт. – К.: НТУУ «КПІ», 2013. – 72 с.

АНОТАЦІЇ

Мельничук Г.В. Розвиток методів аналізу стаціонарних режимів роботи електротехнічних Smart- комплексів. – 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, м. Київ, 2021.

У дисертаційній роботі здійснено проаналізовано сучасні тенденції розвитку нових технологій локального електроживлення, у тому числі ЕТК-Smart, основні принципи їх моделювання, отримано аналітичні вирази зображень та оригіналів напруг і струмів.

Розвинуто методологію аналізу електромагнітних процесів у системах з періодично (циклічно) змінюваними параметрами генераторів та навантажень з використанням методу окремих складових, отримано аналітичні вирази для розрахунку інтегральних характеристик, проведено аналіз можливостей застосування отриманих аналітичних виразів у разі дії періодичних кондуктивних завад різної форми.

Запропоновано алгоритм електротехнічного обстеження (енергоаудиту) електротехнічних комплексів та концепцію побудови та модернізації елементів ЕТК-Smart для Smart-технологій інтелектуального міста.

Ключові слова: електротехнічні комплекси, локальні системи електроживлення, інтелектуальні електроенергетичні системи, операторний метод аналізу, метод окремих складових, Smart Grid, Microgrid, Smart City.

Melnychuk H.V. Development of methods for analysis of stationary modes of operation of electrotechnical Smart-complexes. – Manuscript.

The thesis is for getting a degree of engineering sciences candidate in 05.09.03 specialty – «Electrotechnical complexes and systems». – **National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, 2021.**

The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of technical sciences on a specialty 05.09.03 – Electrotechnical complexes and systems. – National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky» Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2021.

In the dissertation work the modern tendencies of development of new technologies of local power supply, including electrotechnical Smart-complexes, the basic principles of their modeling are carried out, analytical expressions of images and originals of voltages and currents are received.

The methodology of analysis of electromagnetic processes in systems with periodically (cyclically) changing parameters of generators and loads using the method of separate components is developed, analytical expressions for calculation of integral characteristics are received, the possibilities of application of the received analytical expressions in case of periodic conductive disturbances of various form are carried out.

The algorithm of electrotechnical inspection (energy audit) of electrotechnical complexes by use of the offered methodology of the analysis of the established modes and the generalized algorithm of calculation of electromagnetic processes in electrotechnical Smart-complexes is offered, and also the concept of construction and modernization, including electro-complexes for Smart cities.

The results of the dissertation research were used to assess losses due to periodic disturbances in the power grid of traction substations of the Chernihiv Trolleybus Department within the USAID project «Development and justification of development plan and ways to improve the efficiency of public electric transport in Chernihiv»; developed a package of programs that allows calculations and analysis of the characteristics of electrical complexes containing electrical circuits with periodically changing parameters, provided for use in LLC «Electrosphere» (Kyiv); proposals to increase the energy efficiency of electrical complexes of decentralized power supply of water utilities, in particular, for remote settlements, in conditions of unstable energy supply and the use of solar and wind turbines, transferred to LLC «Interproject GmbH» (Kyiv) ; The experience was used in the educational process at the Department of Power Supply of the Institute of Energy Conservation and Energy Management of the National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute of Igor Sikorsky».

Keywords: electrotechnical complexes, local power supply systems, intelligent power systems, operator method of analysis, method of separated components, Smart Grid, Microgrid, Smart City.

Підписано до друку 01.04.21 р. Формат 60х90¹/16
Ум.друк.арк. 0,9 Обл-вид.арк. 0,9
Наклад 100 прим. Замовлення №14269
Віддруковано на різнографі у поліграфії «KPI print»
03055, м.Київ, вул.Політехнічний провулок, буд. 1/33
Тел./факс: 320683088875
Е-мейл: kpi@kpi-print.com.ua

