

# ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES

УДК 621.316

С.П. Денисюк, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-6299-3680

М.О. Коломійчук, студентка, ORCID 0000-0002-7967-6112

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Г.В. Мельничук, магістр промислової електроніки, ORCID 0000-0002-8173-0472

Міністерство розвитку громад та територій України

## РОЗВИТОК МОЖЛИВОСТЕЙ МЕТОДУ ОКРЕМИХ СКЛАДОВИХ ДЛЯ АНАЛІЗУ РЕЖИМІВ У ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ SMART- КОМПЛЕКСАХ

Розглянуто особливості формування локальної електроенергетичної системи за концепцією Smart Grid, що потребує якісно нової архітектури системи енергозабезпечення та нових принципів функціонування – як на рівні технічних рішень, так і механізмів організаційної взаємодії на технологічному рівні та фінансових розрахунків. Проаналізовано науково-технічні проблеми, пов'язані з функціонуванням окремих типів електротехнічних Smart-комплексів (ETK-Smart), визначено особливості аналізу електротехнічних комплексів з нелінійними елементами шляхом аналізу процесів у разі змін активних та реактивних навантажень, що дає змогу враховувати відповідні зміни параметрів при розрахунках електромагнітних процесів за допомогою аналітичних методів. Удосконалено методологію оцінки впливу кондуктивних періодичних завад на протікання усталеного режиму в електротехнічних Smart-комплексах. Розглянуто принципи аналізу (моделювання) ETK-Smart як систем з періодично змінюваними параметрами. Показано, що застосування ETK-Smart зумовлює прискіпливу увагу до аналізу усталених та перехідних, у тому числі й модульованих, режимів, у випадку формування різноманітних графіків протікання енерготехнологічних та технологічних процесів, електроживлення різноманітних типів навантажень тощо. Сформульовано алгоритми розрахунку струмів у електричних комплексах з циклічно змінюваними параметрами, а також аналізу впливу періодичних кондуктивних завад в елементах ETK-Smart з перетворювачами електроенергії на основі розвитку можливостей методу окремих складових при моделюванні усталених режимів, що дозволяє здійснювати автоматизацію відповідних розрахунків за допомогою обчислювальної техніки. Наведено алгоритми аналізу електромагнітних процесів у ETK-Smart із змінюваними параметрами та RL-навантаженням для складних періодичних, аналізу системи у разі нелінійних елементів, врахування при аналізі внутрішнього опору генератора та ліній передачі, аналізу процесів при стрибкоподібній зміні параметрів реактивних елементів (індуктивності  $L$  та ємності  $C$ ), аналізу впливу періодичних кондуктивних завад (на змінному та постійному струмі) на електромагнітні процеси в елементах ETK-Smart з перетворювачами електроенергії. Наведено основи методичного забезпечення оцінки енергоефективності ETK-Smart як елементів інтелектуальних систем електроживлення. Запропоновано алгоритм електротехнічного обстеження (енергоаудиту) електротехнічних комплексів шляхом застосування запропонованих аналітичних виразів та узагальненого алгоритму розрахунку електромагнітних процесів у електричних комплексах з циклічно змінюваними параметрами, що дає змогу здійснювати відповідні оцінки енергоефективності функціонування Microgrid. Запропоновано концепцію формування (побудови) та модернізації оптимізації елементів Smart-технологій для Smart-мікрорайону інтелектуального міста шляхом розроблення алгоритму здійснення відповідних досліджень і оцінок та формування мережі Microgrid (ETK-Smart з перетворювачами електроенергії) кількох рівнів ієрархії, що дозволяє здійснювати вибір оптимальних параметрів Microgrid та оцінку загальних показників енергоефективності функціонування Smart-мікрорайону інтелектуального міста. Представлені приклади аналізу підтверджують ефективність застосування модифікації методу окремих складових для аналізу усталених режимів ETK-Smart.

**Ключові слова:** електротехнічні Smart-комплекси, Microgrid, перетворювачі електроенергії, модифікація методу окремих складових, усталений режим, кондуктивні завади, алгоритми розрахунку, оцінка енергоефективності.

© С.П. Денисюк, М.О. Коломійчук, Г.В. Мельничук, 2021

## Вступ

Одним з ключових напрямків науково-технічного прогресу в електротехніці, обумовлених загальною тенденцією поширення електрифікації і автоматизації, технологічних інновацій і нових економічних та інформаційних взаємодій, є запровадження Smart-технологій на базі електротехнічних Smart-комплексів (далі – ЕТК-Smart) шляхом поширення концепції Smart Grid (інтелектуальна мережа) [1, 2]. Модернізація електротехнічних комплексів відповідно до вимог концепції Smart Grid у разі зростання частки відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) та урізноманітнення топологій електроенергетичних систем призводить до суттєвої зміни основних режимів роботи цих електротехнічних об'єктів, необхідності вирішення проблем ефективного функціонування систем електроживлення, реалізації законів оптимального керування при врахуванні спотворень напруги та струму, забезпечення заданих рівнів електромагнітної сумісності.

Формування локальної електроенергетичної системи за концепцією Smart Grid потребує якісно нової архітектури системи енергозабезпечення та нових принципів функціонування – як на рівні технічних рішень, так і механізмів організаційної взаємодії на технологічному рівні та фінансових розрахунків. Враховуючи, що основною зацікавленою стороною створення Smart Grid є органи місцевого самоврядування, впровадження таких систем можуть ефективно здійснювати локальні енергетичні компанії, що працюють з кінцевими споживачами електроенергії.

Загалом можна виділити такі ключові чинники, що спричиняють значний вплив на зміни структури електроенергетичних систем на локальному рівні та водночас сприяють кластеризації електромереж і розвитку електротехнічних комплексів [1, 3, 4]:

- 1) значне здешевлення засобів локальної електрогенерації, насамперед ВДЕ (сонячні батареї, вітрові установки);
- 2) поява активного споживача (просюмера), коли власник засобів локальної електрогенерації є одночасно як споживачем електроенергії, у тому числі з централізованої мережі, так і її постачальником;
- 3) поява ефективних технологій накопичення та зберігання електроенергії у локальних масштабах; 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 керування попитом, 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 просюмера на енергоринку, у тому числі на основі принципів мультиагентного керування.

## 1. Аналіз науково-технічних проблем, пов'язаних з функціонуванням окремих типів ЕТК-Smart

За результатами досліджень розвитку та особливостей роботи сучасних електротехнічних комплексів визначимо, що **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.

Характерною особливістю сучасних ЕТК-Smart є збільшення кількості споживачів з нелінійними ВАХ, які обумовлюють появу в системі струмів і напруги несинусоїдної форми. Високий рівень вмісту гармонік негативно впливає на ефективність роботи промислового електрообладнання, обчислювальної техніки, побутових приладів, призводить до зростання втрат електроенергії, спричиняє прискорене старіння ізоляції.

Сукупність електрообладнання, яким реалізують сучасні електротехнології, слід розглядати як єдиний ЕТК-Smart, до якого входять: система електроживлення та розподілу енергії; система головних та допоміжних електроприводів і перетворювачів електроенергії; система автоматизації, захисту, діагностики тощо. ЕТК-Smart практично завжди мають досить різноманітний склад електрообладнання. Робота такого обладнання пов'язана з електричними режимами, які мають суттєвий вплив на терміни нормальної його експлуатації. Основним чинником, що впливає на стан електрообладнання, є його навантаження, яке далеко не завжди відповідає номінальній потужності.

Наразі поширення набули Microgrid як важливий елемент локального енергозабезпечення та розвитку ЕТК-Smart, які можна класифікувати на три типи відповідно до їх функціонального призначення [5]:

- ЕТК-Smart з виробництва електроенергії за допомогою альтернативних джерел енергії (невеликі ГЕС, сонячні та вітряні установки, генератори на біогазі чи інших видах палива);
- ЕТК-Smart, які забезпечують підвищені вимоги споживачів до якості електроенергії та надійності

електропостачання, зокрема, об'єкти та системи критичної інфраструктури (медичні центри, фінансові установи, системи безпеки та забезпечення життєдіяльності);

– віддалені мікромережі з ЕТК-Smart, які, як і перший тип, застосовують локальні джерела електроенергії, а також мають вимоги до керування резервами потужності у випадку надзвичайних ситуацій.

Виділені Microgrid з різними типами ЕТК-Smart, як правило, працюють в умовах обмеження потужності вхідного джерела, а також «непередбачуваності» навантажень, що визначає їх випадковий характер, як за величиною активної потужності, так і за характером – навантаження можуть бути одно- або трифазними, збалансованими (симетричними) або незбалансованими, лінійними або нелінійними. Несиметрія і гармонічні спотворення напруги можуть викликати серйозні проблеми з обладнанням, такі як вібрація, перенапруження, перегрівання тощо. Важливим напрямом вдосконалення ЕТК-Smart, підвищення їх енергоефективності, розвитку систем локального енергопостачання є широке використання перетворювачів електричної енергії [6 – 8]. Це зумовлює подальше вдосконалення і, відповідно, ускладнення конструкції ПЕЕ, збільшення кількості їх типів, ускладнення форми (виду) електричних сигналів, систем керування, потребу в розширенні можливостей адаптації електричних сигналів до миттєвих параметрів локальної або загальної енергетичної системи, зумовлених зміною режимів роботи генераторів електричної енергії та особливостями технологічних процесів.

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 (ШП, випрямлячів, інверторів, бітиристорних регуляторів), для яких режими відбору струму від системи можуть накладатися;
- робота електричних приладів у будинках, комерційних та бюджетних будівлях, режими яких також можуть накладатися;
- наявність височастотних ударних технологій;
- крокові механізми, крокові двигуни;
- джерела вторинного живлення, наприклад, на основі ШП;
- паралельна робота в періодичних режимах «увімкнено/вимкнено» низки промислових 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.

Звичайно, процес функціонування більшості наведеного обладнання та приладів є стохастичним. Однак для окремих інженерних розрахунків (наприклад, попередньої оцінки умов функціонування, проведення експрес-аналізу) режими роботи можна представити детермінованими функціями з циклічно-змінюваними параметрами.

## **2. Принципи аналізу (моделювання) ЕТК-Smart як систем з періодично змінюваними параметрами**

Застосування ЕТК-Smart зумовлює прискіпливу увагу до аналізу усталених та перехідних, у тому числі й модульованих, режимів, у випадку формування різноманітних графіків протікання енерготехнологічних та технологічних процесів, електроживлення різноманітних типів навантажень тощо [4, 7, 9, 10].

Різні типи ПЕЕ та навантажень в ЕТК-Smart мають різкозмінний характер споживання електроенергії. Вони обумовлюють режими, яким відповідають модульовані по амплітуді та фазі напруга і струм. Як наслідок, виникає необхідність моделювання електромагнітних процесів в ЕТК-Smart на інтервалі часу, який перевищує періоди роботи генераторів і перетворювачів (далі цей інтервал часу назвемо періодом технологічного процесу  $T_T$ ), врахування при цьому різних типів модуляції діючих сигналів та функцій зміни параметрів елементів, врахування нелінійностей та параметричних залежностей окремих елементів, які є суттєвими для функціонування ЕТК-Smart. Виникає задача формування відповідних типів математичних моделей та алгоритмів аналізу [11 – 15].

У переважній більшості випадків для аналізу електромагнітних процесів у виділених ЕТК-Smart здійснюють лінеаризації характеристик, однак прагнення лінеаризувати всі суттєво нелінійні процеси в багатьох випадках не дозволяє вирішити поставлені задачі [7, 15, 16]. Цілу низку важливих та

принципових задач електротехніки та силової електроніки неможливо вирішити без урахування нелінійних залежностей. До таких випадків, наприклад, відносять кусочно-постійні ступеневі зміни амплітуди коливань, збудження в генераторах вищих гармонік, захват частоти генератора тощо [7, 15].

Перехідні процеси в нелінійних електричних колах описуються нелінійними диференціальними рівняннями, загальних методів інтегрування яких не існує. На нелінійні кола не поширюється принцип суперпозиції, тому засновані на ньому методи, зокрема класичний або з використанням інтеграла Дюамеля, для розрахунку даних кіл непридатні. 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. Для інтегрування нелінійних диференціальних рівнянь розроблена велика кількість різноманітних математичних методів для їх обчислення, орієнтованих на різні типи рівнянь.

Для задач електротехніки всі методи розрахунку за своєю сутністю можуть бути розділені на три групи [7, 15, 16]:

- аналітичні методи, що припускають або аналітичне вираження характеристик нелінійних елементів, або їхню кусочно-лінійну апроксимацію;
- графічні методи, основними операціями у яких є графічні побудови, часто супроводжувані допоміжними обчислювальними етапами;
- чисельні методи, засновані на заміні диференціальних рівнянь алгебраїчними для збільшень перемінних за відповідні інтервали часу.

Вибір методу аналізу ЕКТ визначається структурою та характеристиками використаних моделей, елементів, які можуть бути лінійними, нелінійними та параметричними [15, 17, 18]. Так, нелінійність конкретних елементів може бути суттєвою та несуттєвою. Суттєва нелінійність, на відміну від несуттєвої, частіше за все є причиною принципово нових явищ, які неможливі у лінійних колах, та у багатьох випадках лежать в основі принципу роботи пристроїв.

У випадках, коли точність аналізу ЕКТ не є необхідною, для розв'язання диференціальних рівнянь низьких порядків можна застосовувати графічні та інші наближені методи [7, 15]. Позитивом наближених методів є зручність їх практичного використання та можливість отримання розв'язку в загальному вигляді, в аналітичній формі. Це дозволяє дослідити в загальному вигляді вплив різних факторів на протікання перехідних процесів, визначити області значень параметрів, які допускають практичний розв'язок тощо. Однак для розв'язку задачі у загальному вигляді необхідно приймати додаткові припущення або обмеження, накладені або на клас схем, або на співвідношення між параметрами схеми, або на режими роботи перетворювача, або на вид збуджуючих факторів тощо.

Після широкого впровадження обчислювальної техніки поширення набули чисельні методи [7, 17 – 19]. Однак вони мають той само суттєвий недолік, що і графічні: отриманий розв'язок відповідає конкретному випадку, для якого задані конкретні параметри та початкові умови.

Цього недоліку немає у аналітичних методів, які хоча також звичайно є наближеними, однак існує можливість дослідження поведінки електричного кола при зміні окремих параметрів [7, 15, 17].

### **3. Розвиток можливостей методу окремих складових для моделювання усталених режимів у ЕТК-Smart**

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

- 1) побудова графіків або таблиць залежностей циклічних змін параметрів електричного кола від часу, у однаковому масштабі, визначення функцій генератора  $U_T(t)$  та навантаження  $Z(t)$ ;
- 2) побудова зображень функцій генератора  $U(p)$  та навантаження  $Z(p)$  за допомогою перетворень Лапласа:  $U(p) = L\{U_T(t)\}$ ,  $Z(p) = L\{Z(t)\}$ ;
- 3) побудова 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  $i(t) = L^{-1}\{I(p)\}$ .

#### **Особливості аналізу системи у разі нелінійних елементів**

При аналізі систем, які містять нелінійні елементи, необхідно передбачати етап лінеаризації нелінійностей та визначення моментів часу  $t_i$ , коли необхідно здійснити перехід від апроксимації нелінійного елемента  $i$ -ю лінійною залежністю до апроксимації  $(i+1)$ -ю лінійною залежністю.

Для визначення моментів часу  $t_i$  в загальному випадку потрібно задіяти ітераційну процедуру розрахунку з послідовним уточненням таких моментів часу.

Також зазначимо, що за рахунок лінеаризації нелінійних елементів кількість інтервалів сталості структури, на яких параметри елементів ЕТК-Smart є незмінними, зростає. Проте методологія розрахунку електромагнітних процесів, розглянута у попередніх підрозділах дисертаційного дослідження, залишиться

без змін.

**Врахування при аналізі внутрішнього опору генератора  $R_{\Gamma}$  та ліній передачі  $R_{\text{Л}}$ .**

Алгоритм врахування при аналізі внутрішнього опору генератора  $R_{\Gamma}$  та ліній передачі  $R_{\text{Л}}$ :

- 1)  $R_{\text{ВН}} = R_{\Gamma} + R_{\text{Л}} = 0$ ;  $E_{\text{ЕКВ}}^{(1)}(t) = E(t)$ ;
- 2) Перший крок ітераційного процесу: розрахунок миттєвих значень струму  $i_{\text{Н}}^{(1)}(t)$  у виділеному контрольованому перетині;
- 3) Визначення параметрів еквівалентного генератора  $E_{\text{ЕКВ}}^{(2)}(t) = E_{\text{ЕКВ}}^{(1)}(t) - R_{\text{ВН}} \cdot i_{\text{Н}}^{(1)}(t)$ ;
- 4) Другий крок ітераційного процесу: розрахунок миттєвих значень струму  $i_{\text{Н}}^{(2)}(t)$  у виділеному контрольованому перетині;
- 5) Визначення параметрів еквівалентного генератора  $E_{\text{ЕКВ}}^{(3)}(t) = E_{\text{ЕКВ}}^{(2)}(t) - R_{\text{ВН}} \cdot i_{\text{Н}}^{(2)}(t)$ ;
- 6) За результатами оцінки норми  $\| E_{\text{ЕКВ}}^{(3)}(t) - E_{\text{ЕКВ}}^{(2)}(t) \| \leq \epsilon_{\text{Е}}$ ,  $\epsilon_{\text{Е}}$  – точність апроксимації, визначається умова доцільності переходу на наступний крок ітераційного процесу.

Для інженерних розрахунків часто буває достатньо двох чи трьох кроків ітераційних процесів аналізу.

**Аналіз процесів при стрибкоподібній зміні параметрів реактивних елементів (індуктивності  $L$  та ємності  $C$ ).**

У разі стрибкоподібної зміни параметрів індуктивності  $L$  та ємності  $C$  у сформованій моделі системи, що розглядається, необхідно врахувати умови некоректної комутації в моменти  $t_i$  зміни параметрів реактивних елементів. Згідно з умовами некоректної комутації для реактивних елементів у моменти часу  $(t_i - 0)$  та  $(t_i + 0)$  має виконуватися принцип безперервності поточкозчеплення, тобто  $i(t_i - 0)L_{i-1} = i(t_i + 0)L_i$ .

Надалі розглянемо випадок стрибкоподібної зміни параметрів індуктивності  $L$  на двох інтервалах часу на період  $[0, T]$ . Наведений підхід надалі може бути поширеним на схеми моделювання за збільшення інтервалів стрибкоподібної зміни параметрів індуктивності  $L$  та ємності  $C$ .

Покладемо, що для 1-го та 2-го інтервалів часу (відповідно  $[0, t_1]$  та  $[t_1, T]$ ) величина індуктивності складає відповідно  $L_1$  та  $L_2$ .

Для моментів часу  $t_1$  та  $T$  запишемо безперервності поточкозчеплення для індуктивності  $L$ :

$$i(t_1 - 0)L_1 = i(t_1 + 0)L_2; i(T - 0)L_2 = i(T + 0)L_1. \quad (1)$$

Виконання принципу безперервності поточкозчеплення в моменти зміни параметрів індуктивності призведе до стрибкоподібної зміни значень струму в моменти  $(t_1 + 0)$  та  $(T + 0)$  у порівнянні відповідно з моментами часу  $(t_1 - 0)$  та  $(T - 0)$ :

$$i(t_1 + 0)L = i(t_1 - 0)L_1; i(T + 0)L_1 = i(T - 0)L_2. \quad (2)$$

Розрахунок електромагнітних процесів має здійснюватися з врахуванням співвідношень (1) та (2), тобто за врахування стрибків струму в моменти зміни параметрів індуктивності  $L$ .

Для цього також може бути задіяний ітераційний процес. Як один із способів організації ітераційного розрахунку можна запропонувати на першому кроці здійснити розрахунок з усередненими значеннями індуктивності  $L_{\text{СР1}} = (L_1 + L_2) / 2$  чи  $L_{\text{СР2}} = (L_1 \cdot t_1 + L_2 \cdot (T - t_1)) / T$ .

**4. Аналіз впливу періодичних кондуктивних завад на електромагнітні процеси в елементах ЕТК-Smart з перетворювачами електроенергії**

**Дія завади на змінному струмі**

Нехай лінія змінного струму характеризується активним опором  $R_{\text{Л}}$  та реактивним елементом  $L_{\text{Л}}$ . Покладемо, що у виділеній системі до лінії підключено джерело змінного струму з частотою  $f_{\text{М}}$ . Для розробки алгоритму оцінки дії періодичних завад на змінному струмі використаємо 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  $U_{\text{МЗ}}$ , 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  $R_{\text{Л}}$  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  $R_L$  у разі дії завади періодичної форми  $U_3(t)$ :

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

$$P_3 = R_L \cdot I_{3d}^2;$$

– втрати енергії від дії завади на виділеному інтервалі часу  $T_T$ :

$$W_{dT} = P_3 \cdot T_T;$$

7. Розрахунок максимальної накопиченої електромагнітної енергії на реактивному елементі  $L$  у разі дії завади:

$$W_{L3} = L \cdot I_{3M}^2 / 2,$$

де  $I_{3M}$  – 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:

$$K_{31} = P_3 / Q_3; \quad K_{32} = (P_3 \cdot f_M) / (P_{AC} \cdot f_3),$$

де  $P_{AC}$  – 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.

#### **Дія завади на постійному струмі**

Нехай лінія постійного струму характеризується активним опором  $r_L$ .

Алгоритм оцінки дії періодичних завад на постійному струмі включає такі кроки:

1. Ідентифікація наявності періодичних завад  $U_3(t)$ .

2. Ідентифікація параметрів періодичної функції  $U_3(t)$ : форми, зокрема, амплітуди  $U_{M3}$ , частоти  $f_3$ .

3. Ідентифікація параметрів реактивних елементів, наприклад, індуктивності  $L$ , які «індукуються» (викликаються) дією завади на частоті  $f_3$  в лінії постійного струму. Можливі ситуації, коли значення цих реактивних елементів будуть нульові або такі малі за значеннями, що ними можна знехтувати ( $L = 0$ ).

4. Розрахунок струму  $i_3(t)$  в лінії постійного струму з параметрами  $R_L$  у разі дії періодичної завади  $U_3(t)$ .

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

6. Аналіз додаткових (привнесених) втрат енергії в лінії постійного струму у разі дії завади періодичної форми  $U_3(t)$ :

– потужність втрат на активному елементі у разі дії завади

$$P_3 = R_L \cdot I_{3d}^2;$$

– втрати енергії від дії завади на виділеному інтервалі часу  $T_T$ :  $W_{dT} = P_3 \cdot T_T$ .

7. Аналіз потужностей накопичення електромагнітної енергії на реактивному елементі  $L$  при дії завади:

$$Q_3 = R_L \cdot I_{3M}^2 / 2,$$

де  $I_{3M}$  – максимальне значення струму в лінії, обумовленого дією періодичних завад.

8. Оцінка впливу завад на електромагнітні процеси в лінії постійного струму. Можна здійснити на основі аналізу коефіцієнтів:

$$K_{31} = P_3 / Q_3; \quad K_{32} = P_3 / P_{CD},$$

де  $P_{CD}$  – потужність втрат у лінії у разі дії постійної напруги.

### **5. Основи методичного забезпечення оцінки енергоефективності ЕТК-Smart як елементів інтелектуальних систем електроживлення**

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 (Demand Side Management, DSM), а також оцінки рівнів узгодженості керування змінними навантаженнями та генераторами, аналізу впливу завад, коли період дії основного сигналу та завади не співпадають.

Розроблена методологія аналізу може бути застосована у разі вибору фільтрокомпенсуючих пристроїв, аналізу процесів у трансформаторно-ключових виконавчих структурах, стабілізаторах напруги, трансформаторах, регульованих під напругою.

Власне 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. Вона також може бути однотипно використана як у разі аналізу електромагнітних процесів, так і у разі формування законів

керування в аналітичному вигляді для систем керування. Аналітичні вирази можуть бути побудовані у разі розгляду періодичних функцій напруги та струму на інтервалі часу, який описує циклічну зміну параметрів, що значно перевищує період мережевої напруги.

Нижче представлено характеристики алгоритму (методичного забезпечення) електротехнічного обстеження (енергоаудиту) електротехнічних Smart-комплексів і Концепції формування (побудови) та модернізації (оптимізації) ЕТК-Smart для побудови енергетичної інфраструктури інтелектуального міста.

**Алгоритм (методичне забезпечення) електротехнічного обстеження (енергоаудиту) електротехнічних комплексів**

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  $\Pi_i$  із множини контрольованих перетинів  $\{\Pi_i\}$  визначення форми еквівалентного генератора напруги  $E_{\text{ЕКВ}}(t)$  та еквівалентного навантаження  $Z_{\text{ЕКВ}}(t)$ .
5. Ідентифікація параметрів еквівалентного генератора напруги  $E_{\text{ЕКВ}}(t)$  та еквівалентного навантаження  $Z_{\text{ЕКВ}}(t)$ ; здійснення за необхідності апроксимації функцій  $E_{\text{ЕКВ}}(t)$  та  $Z_{\text{ЕКВ}}(t)$  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  $E_{\text{ЕКВ}}(t)$  та еквівалентного навантаження  $Z_{\text{ЕКВ}}(t)$  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.

**Елементи Концепції формування (побудови) та модернізації (оптимізації) ЕТК-Smart для побудови енергетичної інфраструктури інтелектуального міста:**

1. Загальна характеристика Smart-мікрорайону інтелектуального міста.
2. Визначення основних напрямків розвитку Smart-мікрорайону інтелектуального міста з точки зору формування окремих типів Microgrid.
3. Визначення меж Smart-мікрорайону інтелектуального міста.
4. Оцінка доцільності введення додаткових ступенів трансформації напруги (амплітуди та частоти), роботи системи на постійному струмі.
5. Оцінка доцільності використання пристроїв силової електроніки.
6. Формування загальної ієрархії Microgrid за секторами застосування.
7. Розгляд Microgrid  $i$ -го рівня.
8. Визначення напрямків застосування змінного та постійного струму.
9. Залучення нових Smart-технологій для забезпечення електроживлення конкретної групи споживачів / навантажень (одного споживача / навантаження).
10. Формування узагальнених макромоделей з використанням операцій декомпозиції та редукції.
11. Формування переліку блоків Microgrid  $i$ -го рівня, де потрібно здійснити уточнення режимів, параметрів чи структури системи (прив’язка структури Microgrid до місця, вибір об’єктів для модернізації).
12. Задання меж зміни параметрів; проведення аналітичних розрахунків процесів; формування системи інтегральних характеристик (показників), які описують якість електроенергії та / чи якість електроживлення.
13. Вибір оптимальних параметрів чи режимів Microgrid  $i$ -го рівня.
14. Оцінка нормальних та / чи екстремальних режимів функціонування окремих Smart-технологій.
15. Оцінка показників (характеристик) енергоефективності функціонування Smart-мікрорайону інтелектуального міста.
16. Оцінка екологічних та соціальних факторів функціонування Smart-мікрорайону інтелектуального міста.

Мета Концепції – оптимізації параметрів, режимів та структури елементів Smart-технологій для енергетичної інфраструктури інтелектуального міста.

Основними технічними рішення з впровадження Smart Grid для побудови Smart City є [3]:

- створення єдиного диспетчерського центру керування енергосистемою з високим ступенем автоматизації, використанням «великих даних» (Big Data), можливостями безпосереднього керування компенсаторними потужностями та споживанням;
- скорочення радіусу енергозабезпечення шляхом застосування генераторів електроенергії малої та середньої потужності як основних та компенсаторних потужностей генерації електроенергії, зокрема газових міні-ТЕЦ в межах житлових комплексів та мікрорайонів, станцій спалювання біогазу та сміття та вітрогенераторів у передмістях;
- поширення використання сонячних батарей, зокрема, на дахах муніципальних будівель та багатоквартирних будинках;
- поширення використання локальних накопичувачів електроенергії, зокрема домашніх акумуляторів;
- поширення застосування систем «розумний будинок» / Microgrid з власними джерелами генерації та накопичення електроенергії;
- інтеграція систем енергозабезпечення громадського електротранспорту до єдиної мережі Smart Grid, використання електромобілів у екстрених та комунальних службах, у тому числі мобільних резервних джерел енергії;
- створення мережі енергоцентрів на базі станцій зарядки електромобілів та паркінгів, пов'язаних напряму з локальними потужностями сонячної енергетики.

## 6. Приклади аналізу

### Приклад 1.

Розглянемо приклад розрахунку струму для випадку прямокутного сигналу генератора, коли загальний період роботи схеми складає  $T_T = 8T_0$ , значення  $L = 0,01$  Гн,  $T_0 = 0,02$  с, амплітуда напруги завади  $U = 20$  В, а активний опір та напруга змінюються на кожному інтервалі, у першому випадку активний опір спадає на кожному півперіоді роботи схеми (графіки наведено на рис. 1), у другому випадку – зростає (графіки наведено на рис. 2). Значення  $R$  та  $U$  наведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Значення  $R$  та  $U$  за розрахунку струму для випадку прямокутного сигналу генератора

Випадок 1	Номер інтервалу							
	1	2	3	4	5	6	7	8
$U_{i, В}$	20	40	60	20	-20	-60	-40	-20
Випадок 1 $R_{i, А}$	60	50	30	20	60	50	30	20
Випадок 2 $R_{i, А}$	20	30	50	60	20	30	50	60

Розраховані струми на рис. 1 та 2 демонструють залежність між значенням напруги та еквівалентного опору (за законом Ома) на  $i$ -му ( $i = 1, \dots, 8$ ) інтервалі.

### Приклад 2.

Для дослідження впливу імпульсних завад на роботу навантаження будемо за допомогою генератора періодичних імпульсів подавати прямокутні завади змінної полярності в систему з синусоїдальною напругою.

Розглянемо два випадки завади:

- 1) імпульсна завада на кожному з півперіодів складається з двох однополярних імпульсів (рис. 3);
- 2) імпульсна завада на кожному з півперіодів складається з двох різнополярних імпульсів (рис. 4)



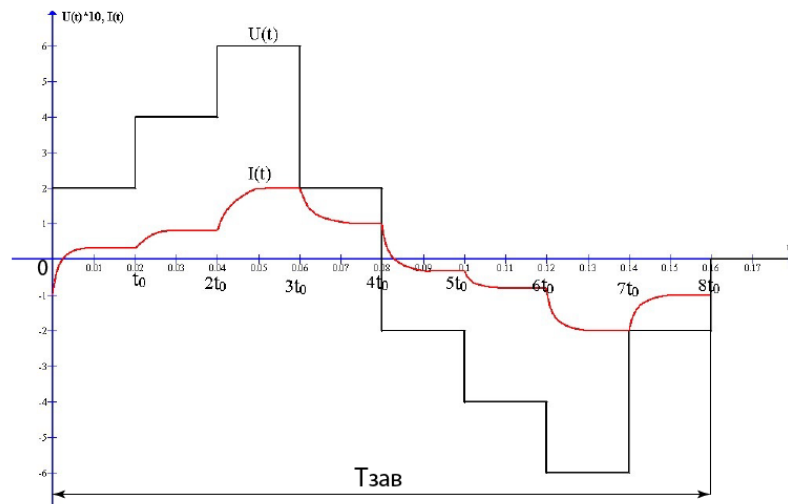


Рис. 1 – Графік напруги та струму завади у разі зменшення активного опору

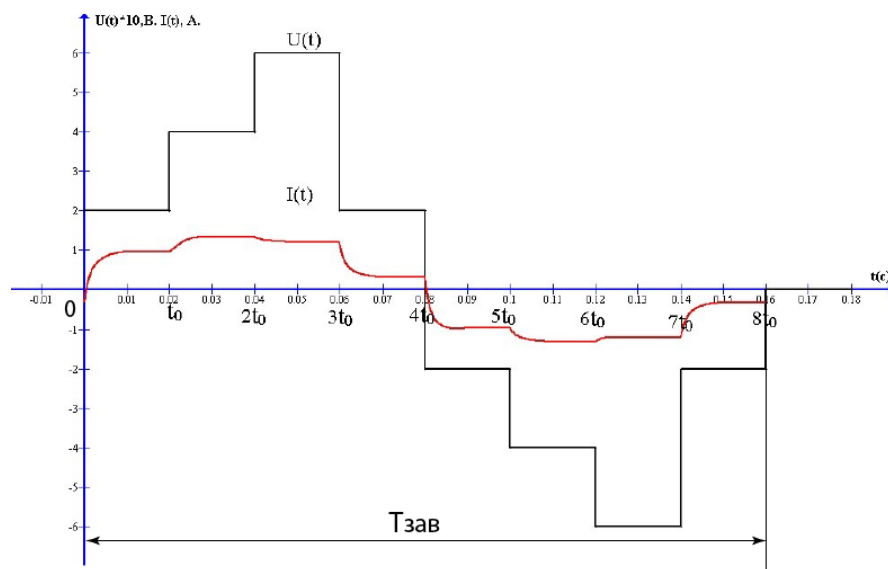


Рис. 2 – Графік напруги та струму завади у разі зменшення активного опору

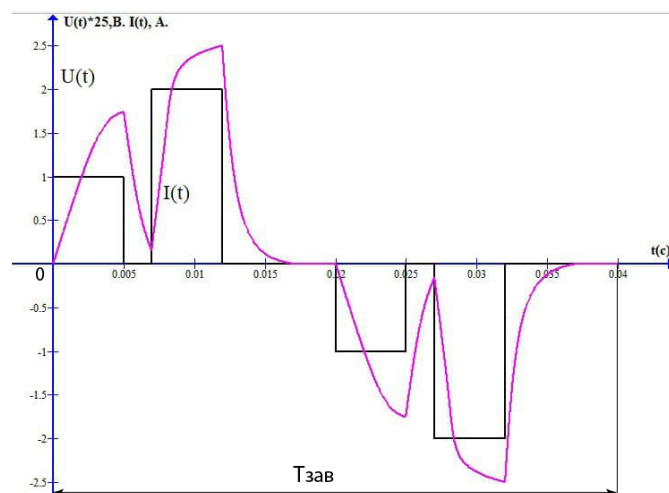


Рис. 3 – Графік струму та напруги завади при збільшенні напруги та зменшенні активного опору

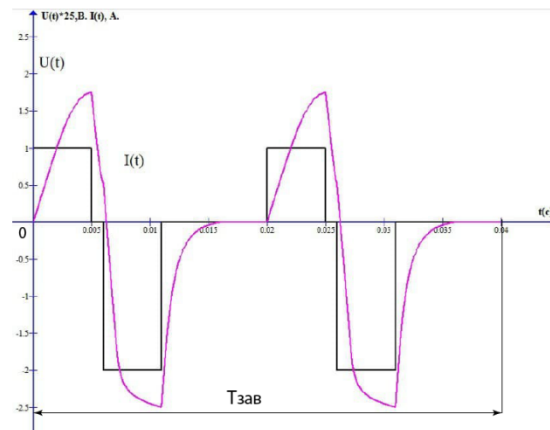


Рис. 4 – Графік струму та напруги завади при збільшенні напруги та зменшенні активного опору

Розраховані струми на рис. 3, 4 відображають однополярність та різнополярність імпульсів завад на півперіоді та величину шпаркості імпульсної послідовності.

**Приклад 3.** Розглянемо випадок розрахунку завади у вигляді синусоїдального сигналу, період якої вдвічі більший за період роботи схеми. Для прикладу використаємо значення  $L=0,05$  Гн,  $T_0=0,01$  с,  $T_{зав}=4T$ , амплітуда напруги завади  $U=20$  та 10 В, а активний опір (в омах) змінюється на кожному інтервалі  $T$  – у нашому випадку спадає ( $R_1=50$ ,  $R_2=40$ ,  $R_3=30$ ,  $R_4=20$ ), графіки наведено на рис. 5, 6.

У даному випадку завада являє собою модульований синусоїдальний сигнал, причому на півперіоді  $T_{зав}/2$  послідовність двох «півсинусоїд» може бути як різнополярна (рис. 5), так і однополярна (рис. 6).

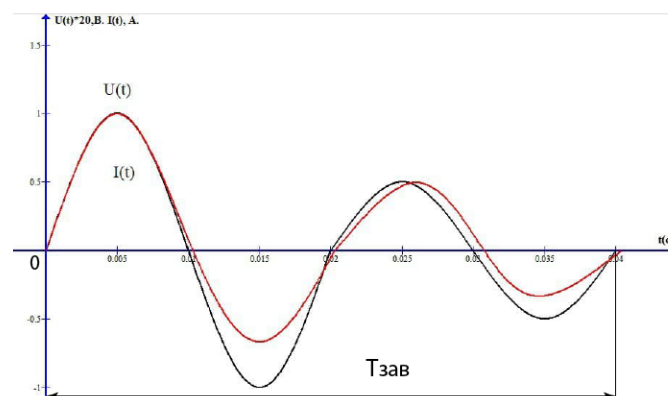


Рис. 5 – Графік напруги та струму завади за зменшення активного опору та зменшення напруги

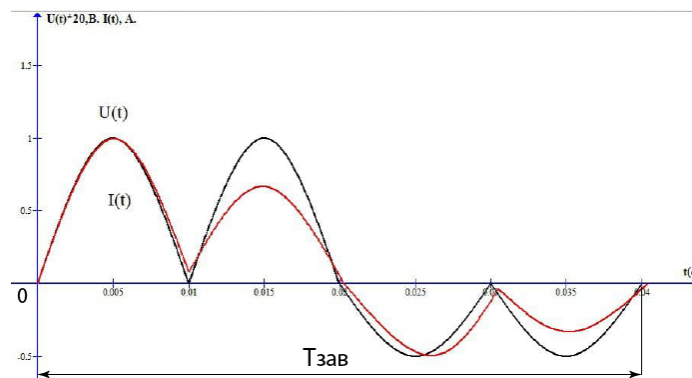


Рис. 6 – Графік напруги та струму завади за зменшення активного опору та зменшення напруги

Розрахований струм при дії модульованих періодичних завад (див. рис. 6) являє також модульований періодичний сигнал, форма якого визначається як дією періодичної модульованої напруги, так і наявності *RL*-навантаження.

#### **Висновки**

1. Проаналізовано науково-технічні проблеми, пов'язані з функціонуванням окремих типів ЕТК-Smart, визначено особливості аналізу електротехнічних комплексів з нелінійними елементами шляхом аналізу процесів у разі змін активних та реактивних навантажень, що дає змогу враховувати відповідні зміни параметрів при розрахунках електромагнітних процесів за допомогою аналітичних методів. Удосконалено методологію оцінки впливу кондуктивних періодичних завад на протікання усталеного режиму в ЕТК-Smart.

2. Сформульовано алгоритми розрахунку струмів у електричних комплексах з циклічно змінюваними параметрами, а також аналізу впливу періодичних кондуктивних завад в елементах ЕТК-Smart з перетворювачами електроенергії на основі розвитку можливостей методу окремих складових при моделюванні усталених режимів, що дозволяє здійснювати автоматизацію відповідних розрахунків за допомогою обчислювальної техніки.

3. Запропоновано алгоритм електротехнічного обстеження (енергоаудиту) електротехнічних комплексів шляхом застосування запропонованих аналітичних виразів та узагальненого алгоритму розрахунку електромагнітних процесів у електричних комплексах з циклічно змінюваними параметрами, що дає змогу здійснювати відповідні оцінки енергоефективності функціонування Microgrid.

4. Запропоновано концепцію формування (побудови) та модернізації оптимізації елементів Smart-технологій для Smart-мікрорайону інтелектуального міста шляхом розроблення алгоритму здійснення відповідних досліджень і оцінок та формування мережі Microgrid (ЕТК-Smart з перетворювачами електроенергії) кількох рівнів ієрархії, що дозволяє здійснювати вибір оптимальних параметрів Microgrid та оцінку загальних показників енергоефективності функціонування Smart-мікрорайону інтелектуального міста.

#### **Список використаної літератури**

1. Інтелектуальні електричні мережі: елементи та режими. За заг. ред. акад. НАН України О.В. Кириленка. Київ: Ін-т електродинаміки НАН України, 2016. – 400 с.
2. Денисюк С.П. Технологічні орієнтири реалізації концепції Smart Grid в електроенергетичних системах // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2014. – № 1. – С. 7–21.
3. 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.
4. Denysiuk S., Strzelecki R., Opryshko V. The smart grid concept implementation by expanding the use of demand side management and modern power electronic installations // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2016. – №4 (46). – С.7–17.
5. Мікромережі: світовий досвід та можливості для України. – <http://energycooperative.org.ua/2017/09/28/>
6. Відновлювані джерела енергії в розподільних електричних мережах: монографія / П.Д. Лежнюк, О.А. Ковальчук, О.В. Нікіторович, В.В. Кулик. – Вінниця: ВНТУ, 2014. – 204 с.
7. Кириленко О.В., Жуйков В.Я., Денисюк С.П., Рибіна О.Б. Системи силової електроніки та методи їх аналізу. – К.: Текст, 2006. – 488 с.
8. Benysek G., Kazmierkowski M.P., Popczyk J., Strzelecki R. Power electronic systems as a crucial part of Smart Grid infrastructure – a survey. Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences, Vol. 59, No. 4, 2011. – P. 455–473.
9. Жежеленко И.В., Шидловский А.К., Пивняк Г.Г. и др. Электромагнитная совместимость потребителей. – М.: Машиностроение, 2012.
10. Hopkins D.C., Safiuddin M. Power electronics in a smart-grid distribution system. APEC – 10. 2010. Palm Springs, CA. 83 p.
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.: ІЕД НАНУ, 2003. – № 3(6). – С. 102–108.
12. 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.
13. 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.: ІЕД НАНУ, 2005. – № 3(12). – С. 132–137.

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

15. 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.

16. Руденко В.С. Жуйков В.Я., Коротеєв І.Е. Расчет устройств преобразовательной техники. – К.: Техніка, 1980. – 136 с.

17. Шидловський А.К., Кириленко О.В., Жуйков В.Я. Оцінка стану та перспективи розвитку методів аналізу електромагнітних процесів в перетворювачах електроенергії // Техн. електродинаміка. Темат. вип. "Силовая електроніка та енергоефективність". – 2005. – Ч. 1. – С. 3–16.

18. Белов В.Ф., Буткина А.А., Шамаев А.В. Математическое моделирование систем преобразования электрической энергии для микросетей // Автоматизация процессов управления. – 2014. – № 2 (36). – С. 43–51.

19. Автоматизированное проектирование силовых электронных схем / Жуйков В.Я., Сучик В.Е., Андриенко П.Д., Еременко М.А. – К.: Техніка, 1988. – 132 с.

**S. Denysiuk**, Dr. Sc. Sciences, Prof., **ORCID** 0000-0002-6299-3680

**M. Kolomiichuk**, student, **ORCID** 0000-0002-7967-6112

**National Technical University of Ukraine**

**"Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky"**

**H. Melnychuk**, master of industrial electronics, **ORCID** 0000-0002-8173-0472

**Ministry of Development of Communities and Territories of Ukraine**

## **DEVELOPMENT OF POSSIBILITIES OF THE METHOD OF INDIVIDUAL COMPONENTS FOR ANALYSIS OF MODES IN ELECTRICAL SMART- COMPLEXES**

*The peculiarities of the formation of the local power system according to the concept of Smart Grid requires a qualitatively new architecture of the power supply system and new principles of operation - both at the level of technical solutions and mechanisms of organizational interaction at the technological level and financial calculations. The scientific and technical problems connected with functioning of separate types of electrotechnical Smart-complexes (ETK-Smart) are analyzed, features of the analysis of electrotechnical complexes with nonlinear elements by the analysis of processes in case of changes of active and reactive loadings that allows to consider corresponding changes of parameters at calculations of electromagnetic processes using analytical methods. The methodology for assessing the impact of conductive periodic interference on the flow of the steady state in electrical Smart-complexes has been improved. The principles of analysis (modeling) of ETC-Smart as systems with periodically changing parameters are considered. It is shown that the use of ETC-Smart requires meticulous attention to the analysis of steady-state and transient, including modulated, modes, in the case of formation of different schedules of energy and technological processes, power supply of various types of loads, etc. Algorithms for calculating currents in electrical complexes with cyclically variable parameters, as well as analysis of the influence of periodic conductive interference in ETC-Smart elements with power converters based on the development of the capabilities of the method of individual components in modeling steady-state modules. Thus, algorithms for analysis of electromagnetic processes in ETC-Smart with variable parameters and RL-load for complex periodic, system analysis in case of nonlinear elements, analysis of internal resistance of generator and transmission lines, analysis of processes in abrupt change of parameters of reactive elements (inductance L) and capacitance C), analysis of the influence of periodic conductive interference (AC and DC) on electromagnetic processes in the elements of ETC-Smart with power converters. The basics of methodological support for assessing the energy efficiency of ETC-Smart as elements of intelligent power supply systems are presented. The algorithm of electrotechnical inspection (energy audit) of electrotechnical complexes by application of the offered analytical expressions and the generalized algorithm of calculation of electromagnetic processes in electric complexes with cyclically variable parameters is offered that allows to carry out the corresponding estimations of energy efficiency of functioning. The concept of formation (construction) and modernization of optimization of elements of Smart-technologies for the Smart-microdistrict of the intellectual city by development of algorithm of realization of the corresponding researches and estimations and formation of the Microgrid network (ETC-Smart with power converters) of several levels of hierarchy is offered. and assessment of the general energy efficiency indicators of*

*the Smart-microdistrict of the intellectual city. The presented examples of analysis confirm the effectiveness of the modification of the method of individual components for the analysis of steady-state ETC-Smart.*

**Keywords:** *electrical Smart-complexes, Microgrid, power converters, modification of the method of individual components, steady state, conductive interference, calculation algorithms, energy efficiency assessment.*

#### REFERENCES

1. Intelligent electrical networks: elements and modes. For the general ed. acad. NAS of Ukraine Kirilenko O. Kyiv: Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2016. - 400 p.
2. Denysiuk S. Technological guidelines for the implementation of the Smart Grid concept in power systems // *Energy: economics, technology, ecology*. - 2014. - № 1. - P. 7–21.
3. 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.
4. Denysiuk S., Strzelecki R., Opryshko V. The smart grid concept implementation by expanding the use of demand side management and modern power electronic installations // *Енергетика: економіка, технології, екологія*. – 2016. – №4 (46). – С.7–17.
5. Micronetworks: world experience and opportunities for Ukraine. - <http://energycooperative.org.ua/2017/09/28/>
6. Renewable energy sources in distribution electric networks: monograph / Lezhniuk P., Kovalchuk O., Nikitorovich O., Kulik V. - Vinnytsia: VNTU, 2014. - 204 p.
7. Kirilenko O., Zhuikov V., Denysiuk S., Rybina O. Power electronics systems and methods of their analysis. - 2006. - 488 p.
8. Benysek G., Kazmierkowski M., Popczyk J., Strzelecki R. Power electronic systems as a crucial part of Smart Grid infrastructure – a survey. Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences, Vol. 59, No. 4, 2011. – P. 455–473.
9. Zhezhenko I., Shidlovsky A., Pivnyak G. etc. Electromagnetic compatibility of consumers. - М.: Mashinostroenie, 2012.
10. Hopkins D.C., Safiuddin M. Power electronics in a smart-grid distribution system. APEC – 10. 2010. Palm Springs, CA. 83 p.
11. Denysiuk S., Melnichuk G. Application of Laplace transform for analysis of electromagnetic processes in systems with cyclically variable parameters of elements // *Proceedings of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine: Coll. Science. pr.* - К.: IED NASU, 2003. - № 3 (6). - P. 102–108.
12. Denysiuk S., Melnichuk G. Construction of Laplace transform in the analysis of electromagnetic processes in complexes with cyclically variable parameters // *Electronics and communication*. - 2005. - № 26. - P. 29 - 36.
13. Denysiuk S., Melnichuk G. Formation of a system of equations of state variables for calculation of processes in electric complexes with cyclically variable modes // *Proceedings of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine: Coll. Science. pr.* - К.: IED NASU, 2005. - № 3 (12). - P. 132–137.
14. . Zhuikov V., Denysiuk S. Energy processes in electric circuits with key elements. – К.: TEKST, 2010. – 264 p.
15. Zhuikov V., Denysiuk S., Melnichuk G. Modeling of systems with power converters with cyclically variable parameters. - К.: «Nash format», 2018. - 165 p.
16. Rudenko V., Zhuikov V., Koroteev I. Calculation of devices of converting equipment. – К.: Machinery, 1980. - 136 c.
17. Shidlovsky A., Kirilenko O., Zhuikov V. Estimation of a condition and prospects of development of methods of the analysis of electromagnetic processes in converters of the electric power // *Techn. electrodynamics thematic issue "Power Electronics and Energy Efficiency"*. - 2005. - Ch. 1. - P. 3–16.
18. Belov V., Butkina A., Shamaev A. Mathematical modeling of electrical energy conversion systems for micronets // *Automation of control processes*. - 2014. - № 2 (36). - P. 43–51.
19. Автоматизированное проектирование силовых электронных схем / Жуйков В.Я., Сучик В.Е., Андриенко П.Д., Еременко М.А. – К.: Техніка, 1988. – 132 с. Automated design of power electronic power electronic circuits / Zhuikov V., Suchik V., Andrienko P., Eremenko M. - К.: Machinery, 1988. - 132 p.

Надійшла 15.03.2021  
Received 15.03.2021