

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Гапона Дмитра Анатолійовича на тему «Методи та засоби аналізу якості електропостачання та електромагнітної сумісності електротехнічних комплексів та систем», подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

Актуальність теми. Розв'язання проблеми забезпечення високої якості електропостачання електротехнічних комплексів та систем вимагає вирішення цілої низки питань, таких як розробка методик, впровадження нормативів, конструювання та виробництво апаратних засобів. Особливістю систем енергопостачання є те, що кожен учасник обміну електричною енергією може впливати на її якість. Саме тому при обговоренні пов'язаних проблем використовується термін «електромагнітна сумісність», тобто процес передачі електричної енергії слід розглядається як взаємодія електротехнічних комплексів споживачів з мережею електропостачання та між собою. Наслідками порушень норм електромагнітної сумісності можуть бути такі події як пошкодження обладнання, зменшення строку його служби, зупинки виробництва або порушення технологічних процесів, додаткові втрати електричної енергії у елементах передавальної мережі. Таким чином, необхідне комплексне розв'язання питання якості електропостачання та втрат потужності у процесі передачі електроенергії і саме його рішення і присвячена дисертаційна робота Гапона Д.А.

На даний час, згідно Українського законодавства, уся відповідальність за низьку якість електричної енергії покладається на постачальника, в той час, як реальними порушниками частіше бувають споживачі. Тим не менш притягнути їх до відповідальності майже неможливо і головною причиною цього, є відсутність ефективної універсальної методики визначення джерела погіршення якості енергії. У будь-якому випадку рішення спірних питань покладається на судову систему та експертів, що суттєво збільшує як строки, так і витрати ресурсів на намагання їх розв'язання. Можливими способами

впливу на суб'єктів енергопостачання та споживання є визначення жорстких обмежень за допомогою законодавчих та нормативних актів, або створення гнучкої системи фінансового стимулювання підвищення якості електропостачання. В умовах ринку більш ефективними представляється другий шлях, і тому розробка уніфікованого підходу до вирішення проблеми створення ринкових важелів забезпечення взаємодії постачальника і електротехнічних систем споживача електричної енергії є вкрай важливою і актуальною задачею.

Актуальність роботи підтверджується також тим, що вона пов'язана з виконанням держбюджетної науково-дослідницької теми МОН України: «Розробка теоретичних основ проектування та регулювання гідротурбін» (№0119U002566), та ініціативної теми «Розробка пріоритетних напрямів цифрової енергетики». (№0119U02071180) в яких здобувач був виконавцем окремих етапів.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі.

Усі висновки, наукові положення, методики і рекомендації, що запропоновані в роботі Гапона Д.А., мають глибоке математичне та фізичне обґрунтування. Вони базуються на аналізі науково-технічних джерел за даною проблемою, гармонійній постановці мети і задач дослідження, використанні сучасних методів дослідження, зіставленні і критичному аналізі отриманих результатів у порівнянні з результатами інших дослідників, і якісному формулюванні отриманих висновків. Теоретичні дослідження використовують методи теорії електричних кіл та лінійної алгебри для розрахунків параметрів схем електричних мереж, перетворення Фур'є для розкладання функцій струмів та напруг на гармонійні складові, метод Ньютона-Рафсона для пошуку коренів трансцендентних рівнянь, метод апроксимації функції найменшими квадратами для побудови методу вимірювання параметрів струмів та напруг. Теоретичні методи досліджень підтверджені математичним моделюванням у підсистемі Simulink та розрахунками у обчислювальному середовищі пакета Matlab.

Достовірність результатів дисертаційного дослідження забезпечується коректністю постановок математичних задач, застосуванням стандартних процедур математичного аналізу й методів математичної фізики. Ряд наукових положень підтверджені математичним моделюванням у підсистемі Simulink та розрахунками у обчислювальному середовищі пакета Matlab. Наукові результати здобувача, запропоновані методики успішно використані під час створення нових приладів для проведення обліку енергоспоживання.

До основних нових наукових результатів дисертації слід віднести наступне:

- отримала подальший розвиток теорія оцінки ефективності електропостачання у вигляді коефіцієнтів втрат, що отримані шляхом порівняння поточного споживача з еталонним споживачем, що дозволило отримати математично обґрунтовані інтегральні значення енергетичної ефективності у трифазних трипровідних або чотирьохпровідних системах при несиметричних і несинусоїдальних напругах та струмах;

- вперше запропоновано визначення еталонного реактивного споживача та коефіцієнтів реактивності на основі порівнянь перетоків енергії до споживача та у зворотному напрямку, що дозволило знаходити еквівалентну реактивність та коефіцієнт потужності у однофазних та трифазних мережах при несиметричних і несинусоїдальних напругах та струмах;

- вперше запропоновано методику визначення середньореактивного споживача, що дозволяє отримати порівняльну оцінку енергоефективності у вигляді коефіцієнтів втрат у однофазних та трифазних мережах при несиметричних і несинусоїдальних напругах та струмах;

- вперше запропоновано методи виділення окремих складових енергетичної ефективності, які визначаються несиметрією, нелінійністю, реактивністю та нестационарністю навантаження, що дозволяє визначати проблемні фактори та шляхи підвищення якості електроспоживання;

- вперше запропоновано математичні засади оцінки впливу несиметрії навантаження на енергетичну ефективність режиму енергоспоживання у

вигляді коефіцієнту втрат від несиметрії, що дозволяє отримати кількісну оцінку впливу несиметрії на якість електроспоживання у трифазних мережах при несинусоїдальних напругах та струмах;

- вперше запропоновано математичні засади виділення оцінок впливу нелінійності і реактивності навантаження на енергетичну ефективність режиму енергоспоживання, що дозволяє отримати окремі кількісні оцінки впливу цих факторів у однофазних та трифазних мережах при несиметричних і несинусоїдальних напругах та струмах;

- вперше запропоновано використання коефіцієнту втрат від нестаціонарності як критерію оцінки впливу нестаціонарності споживача на ефективність режиму енергоспоживання, що дозволяє отримати кількісну оцінку впливу нестаціонарності навантаження на якість електроспоживання у однофазних та трифазних мережах при несиметричних і несинусоїдальних напругах та струмах;

- набув подальшого розвитку метод вимірювання параметрів електричної енергії, таких як, частота, амплітуди, фази гармонійних складових і середньоквадратичні значення, особливістю якого є автоматичне підстроювання частоти та тривалості інтервалу спостереження, що дозволяє забезпечити високу точність при будь яких умовах та формах напруг і струмів у мережі;

- вперше запропоновані принципи обліку електричної енергії з врахуванням енергетичної ефективності режиму електроспоживання, що необхідні для економічного стимулювання підвищення якості електропостачання;

- вперше запропоновані принципи обліку електричної енергії з урахуванням можливих порушень норм електромагнітної сумісності, які дозволяє реалізувати ефективні економічні важелі для забезпечення належної якості електричної енергії як з боку споживача, так і з боку електропостачальника.

Наукове та практичне значення отриманих результатів для електричної інженерії полягає у:

- застосуванні методики визначення оцінок якості електропостачання у трифазних трипровідних та чотирьохпровідних мережах, яка дозволяє визначити проблемні фактори та шляхи підвищення цієї якості;

- впровадженні методу комплексного вимірювання показників якості та параметрів режиму трифазних мереж з автоматичним підлаштуванням частоти та тривалості інтервалу спостереження що дозволяє зменшити похибки вимірювання;

- використанні комплексної методики обліку електричної енергії з урахуванням енергетичної ефективності та якості електропостачання, що дозволяє розробити та впровадити нормативи та обладнання необхідні для підвищення енергетичної ефективності та електромагнітної сумісності електротехнічних комплексів та систем;

- розробці системи тарифікації та штрафів на основі запропонованої методики обліку, що необхідна для реалізації фінансової відповідальності за погіршення якості електричної енергії або її невідповідності у точці приєднання споживача.

Запропонована в роботі структура вимірювального приладу дозволяє розпочати промислове виробництво сучасних лічильників електроспоживання з використанням розроблених методів аналізу впливу постачальника та(або) споживача на якість електроенергії.

Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях.

Основні положення та результати дисертаційної роботи достатньо повно опубліковані у 40 публікаціях, у тому числі: 2 колективних монографії 25 наукових статей у фахових виданнях, з яких 4 у виданнях, що входять до міжнародних науково-метричних баз, 10 тез доповідей на українських і міжнародних конференціях і симпозіумах.

У цілому, рівень і кількість публікацій та апробації матеріалів дисертації на конференціях повністю відповідають вимогам МОН України.

Оцінка змісту дисертаційної роботи.

Дисертаційна робота Гапона А.І. складається зі вступу, п'яти розділів,

загальних висновків, списку використаних джерел і додатків.

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету та основні завдання дослідження, наведено відомості щодо зв'язку роботи з науковими програмами, стисло викладено отримані результати, висвітлено наукову новизну, практичне значення отриманих результатів, відзначено методи досліджень, особистий внесок здобувача у спільних публікаціях, висвітлено кількість опублікованих наукових праць і показники структури та обсягу дисертації.

У **першому розділі** наведено загальні дані щодо проблеми електромагнітної сумісності електротехнічних систем. Відзначено необхідність отримати методик у виявлення винуватців недопустимих спотворень напруги в енергосистемах з нелінійними, несиметричними навантаженнями або іншими специфічними властивостями. Розглянуто методи аналізу причин та джерел погіршення якості електроенергії. Виконано аналіз методів оцінки впливу споживачів на спотворення напруги в електричній мережі. Зроблено висновки про те, що жоден із запропонованих підходів не є достатньо універсальним та ефективним для практичного застосування.

У **другому розділі** зроблено аналіз причин щодо погіршення показників якості електроенергії (ПЯЕ) за допомогою математичного моделювання, та оцінка сумісності існуючих нормативних документів. Вказано на недосконалість сучасних методик та стандартів оцінки якості електричної енергії.

Запропоновано алгоритм взаємодії постачальника та споживача з метою поліпшення якості електроенергії, який передбачає: фіксування факту порушення якості електричної енергії; визначення, хто з учасників процесу обміну електричною енергією, і в якій мірі вплинув на характеристики напруги; розробку заходів, щодо виправлення проблеми та компенсації можливих збитків. В умовах ринкових відносин найбільш ефективними і універсальними є фінансові важелі, що дозволяють врегулювати проблемні ситуації. В рамках аналізу причин погіршення ПЯЕ проведено моделювання

вузлів енергосистеми, що дозволяє оцінити вплив споживача та параметрів електричної мережі на параметри напруги в вузлі для різних потужностей джерела, лінії електропередач і споживача(як лінійного, так і нелінійного). Модель використовує підсистему моделювання Simulink пакета програм Matlab. Показано, що найбільш вірогідним «винуватцем» погіршення ПЯЕ є споживач електроенергії.

У третьому розділі розроблено математичні засади оцінки якості електропостачання та електроспоживання у електротехнічних системах. Для оцінки якості електроспоживання пропонуються два підходи. Перший варіант полягає в порівнянні активної потужності, споживаної поточним споживачем, з потужністю такого собі еталонного споживача. Другий варіант зводиться до порівняння величини втрат потужності і отриманні коефіцієнта втрат відносно такого еталонного споживача.

Для цього запропоновано у трифазній чотирихпровідній мережі, незалежно від характеру напруги, еталонного споживача розглядати, як поєднання зірки та трикутника симетричних опорів. А відмінність реального споживача від еталонного описувати відповідними коефіцієнтами втрат від реактивності, нелінійності, нестационарності та несиметрії. Представлено формули для розрахунку цих коефіцієнтів, та проведено аналіз їх властивостей.

У четвертому розділі отримано оцінки характеру залежності і величини імпедансу системи на основі моделі електричного вузла. Також, запропоновано емпіричну залежність норми опору системи від допустимої потужності споживачів. Важливим досягненням є подальший розвиток методу вимірювання показників якості електричної енергії запропонований Ждановим Р., який досягається за рахунок автоматичного підстроювання вимірювального інтервалу, що може бути використано для підвищення точності вимірювання діючих значень струмів і напруг. Запропонований метод доведено до технічної реалізації обліку електричної енергії із застосуванням розробленого математичного апарату. Методика обліку враховує не тільки кількість спожитої енергії, але й характер

електроспоживання, якість електроенергії та наявність порушень меж електромагнітної сумісності з боку споживача.

Обліковий пристрій збирає дані про спожиту енергію, енергію втрат, розраховує нетарифіковану частку електроенергії, яка не підлягає оплаті через невідповідність ПЯЕ, та штрафну енергію, яка виходить за рамки договору постачальника та користувача. Така методика розрахунку дозволяє коректно обробляти випадки, коли: споживач псує електроенергію «сам собі»; споживач псує електроенергію і собі і сусіднім споживачам; споживач порушує допустимі норми електроспоживання.

У п'ятому розділі проведено експериментальні дослідження розроблених методів для чого побудовано прототип пристрою на базі ADE7912 та одноплатного комп'ютеру Radxa Rock. Серія експериментів включала аналіз якості електроспоживання для штучних об'єктів побудованих у вигляді моделі та реальних даних, отриманих при проведенні моніторингу енергосистеми. Надано експериментальні дані, що отримані із штучно згенерованих струмів навантаження, подібного до використаного у розділі 4 для системи із двох споживачів, кожен з яких має змішане активно-нелінійне навантаження.

Також було проведено експериментальну обробку осцилограм отриманих при моніторингу реальних об'єктів енергосистеми, зокрема на шинах підстанції 110КВ що живить тягову мережу залізної дороги. Експериментально доведена коректність розроблених методів оцінки якості електроспоживання. Випробування за допомогою осцилограм, отриманих на реальних трифазних навантаженнях (тягової підстанції) також підтвердило працездатність та ефективність розроблених методів оцінки. В моделях з перевищенням допустимих режимів використання математичного апарату розробленого в розділі 4 дозволило виявити джерело спотворень, навіть за умови декількох нелінійних споживачів.

Загалом, висновки до розділів та за результатами роботи сформульовані достатньо чітко і виразно та відповідають змісту дисертаційної роботи.

Список використаних джерел містить 223 найменування, що є достатнім,

і охоплює сучасні вітчизняні та зарубіжні публікації у цій галузі.

Зміст автореферату відображає основний зміст дисертації та достатньо повно розкриває внесок здобувача в наукові результати та практичну цінність роботи.

По дисертаційній роботі можна зробити наступні зауваження:

1. У дисертації та авторефераті не розкрито зв'язок між ефективністю електроспоживання та якістю електропостачання. Слід було зупинитися на впливі еталонного споживача на якість напруги.

2. У другому розділі розглянуто тільки одну схему електропостачання у окремому режимі, в той час як існує багато інших схем і режимів роботи обладнання. Щоб робити узагальнення необхідно розглядати декілька варіантів.

3. У другому розділі показано, що опір системи впливає на напругу в точці приєднання споживача, а отже, і на його внесок у спотворення якості електроенергії та коефіцієнт потужності. У подальшому матеріалі цей вплив ніяк не враховується та не пояснюється.

4. У третьому розділі відсутні позначення осей на рисунках 3.10..3.32. Для підтвердження зроблених висновків достатньо було меншої кількості даних за кожною з розглянутих гармонік.

5. У четвертому розділі достовірність отриманих значень опору системи доцільно було перевірити з використанням стандартних методик, що використовуються при розрахунках перехідних процесів.

7. У розділі 5 у наведених результатах присутній коефіцієнт втрат миттєвого симетрування, але як у 5-му розділі, так і у попередніх відсутні пояснення щодо його обґрунтування, фізичного сенсу та сфери застосування.

8. При проведенні експериментальних досліджень доцільно було б обчислити традиційними методами значення реактивної потужності та виконати порівняльний аналіз із запропонованими методиками.

9. У розділі 5 наведено велику кількість розрахованих параметрів, значна частина яких не несе суттєвої інформації по темі експерименту. В багатьох випадках відсутні необхідні пояснення.

10. У дисертації та авторефераті зустрічаються орфографічні та пунктуаційні помилки («Особливостями», стор.3; «среднереактивним», стор.5; «Європі», стор. 14; «ціє мети» стор. 18 і так далі).

Висновок.

Дисертаційна робота Гапона Дмитра Анатолійовича «Методи та засоби аналізу якості електропостачання та електромагнітної сумісності електротехнічних комплексів та систем» за своїм змістом відповідає паспорту спеціальності 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи. Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, яка розв'язує важливу наукову задачу, суть якої полягає в підвищенні енергоефективності електротехнічних систем за рахунок забезпечення якості електропостачання та впровадження справедливого розрахунку між постачальником та споживачем за спожиту електроенергію. Дисертаційна робота відповідає вимогам п.п. 9, 10, 12 «Порядку присудження наукових ступенів», щодо докторських дисертацій, а здобувач Гапон Дмитро Анатолійович заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

Офіційний опонент,

професор кафедри електричного транспорту

Харківського Національного Університету

Міського Господарства імені О.М. Бекетова

доктор технічних наук, професор

К. В. Ягуп

Отримав К.В. Ягуп завідувач



Олександр Романенко

15.10.2020

Міського Господарства імені О.