

Голові разової спеціалізованої вченої ради
Національного авіаційного університету
доктору технічних наук, професору,
завідувачу кафедри аеронавігаційних систем
Факультету аеронавігації, електроніки та
телекомунікацій
Національного авіаційного університету
Ларіну Віталію Юрійовичу

РЕЦЕНЗІЯ

**доктора технічних наук, професора, професора кафедри
комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій
аерокосмічного факультету Національного авіаційного університету
Філоненка Сергія Федоровича на дисертаційну роботу
Василець Катерини Сергіївни «Підвищення точності вимірювання
електричної енергії в режимі зниженого навантаження»,
подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії
у галузі знань 15 «Автоматизація та приладобудування» за
спеціальністю 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»**

Актуальність дисертаційної роботи

В умовах суттєвих пошкоджень електроенергетичної інфраструктури України, необхідності акумулювання фінансових ресурсів для повоєнного відновлення електромереж, актуальність підвищення точності обліку електроенергії не викликає сумніву. В країні експлуатуються десятки тисяч одиниць засобів вимірювальної техніки, на основі показів яких здійснюються розрахунки між постачальниками та споживачами електроенергії, питання точності яких набуло особливої актуальності з впровадженням ринку електроенергії. Проте, як показують попередні дослідження, багато вузлів обліку оснащені вимірювальними трансформаторами струму із завищеним номінальним струмом первинної обмотки порівняно з робочими струмами споживачів. Це пов'язано зі зміною умов виробництва, впровадженням енергозберігаючих технологій, встановленням відновлювальних джерел та іншими організаційними обставинами суб'єктів господарювання. Водночас, проект системи електропостачання не оновлюється та засоби вимірювальної техніки не приводяться у відповідність до нових умов функціонування, що знижує точність обліку. Крім того, під час простоїв виробничого обладнання в нічні години, вихідні дні високою є імовірність виникнення режиму зниженого навантаження, що супроводжується суттєвим зниженням струмів через вимірювальні трансформатори. Це суттєво підвищує похибки обліку та може призводити до переходу вимірювальних засобів до режиму нечутливості. Енергопостачальні компанії потребують аргументів на користь приведення вимірювального обладнання до нормованого режиму функціонування. Дана дисертаційна робота і дає аргументовану відповідь на

питання про рівень недообліку електроенергії під час режиму зниженого навантаження вузла обліку. Застосування результатів дисертації в практиці обліку електроенергії дасть змогу підвищити точність фінансових розрахунків між постачальниками та споживачами електроенергії. Це знизить нетехнологічні втрати та дозволить забезпечити матеріальне підґрунтя для відновлення електромереж.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконувалася на кафедрі комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій Національного авіаційного університету, відповідно до Закону України № 3715-VI «Про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні», зокрема, за напрямом «Освоєння нових технологій транспортування енергії, впровадження енергоефективних, ресурсозберігаючих технологій, освоєння альтернативних джерел енергії». Василець К.С. була виконавцем Науково-дослідної роботи «Вимірювання та облік електричної енергії із застосуванням вимірювальних трансформаторів струму в умовах зниженого навантаження» (Національний університет водного господарства та природокористування на замовлення ПрАТ «Рівнеобленерго», UA20-2020-01328/000 від 03.09.2020 р., договір №4-778 від 28.08.2020 р.).

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих у дисертації

Дисертаційне дослідження Василець К.С. характеризується глибиною та комплексністю, охоплює широкий спектр науково-технічних завдань. Пропозиції, що викладені у дисертаційному дослідженні, змістовно та послідовно обґрунтовані. Робота є логічною, матеріал структурованим, а поставлені завдання є чіткими. Достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій доведена обґрунтованістю прийнятих припущень, використанням апробованих методів теоретичних досліджень, встановленням адекватності результатів теоретичних досліджень експериментальним даним. Це підтверджує високий рівень наукової обґрунтованості положень дисертації.

Найбільш суттєві наукові результати, що містяться в дисертації

1. Вперше отримано математичну модель для оцінювання нечіткою функцією невизначеності вимірювання електроенергії вузлом обліку в режимі зниженого навантаження, яка враховує вплив величин несиметричних струмів фаз навантаження на межі нечіткого інтервалу, що характеризує результат вимірювання при граничному рівні довіри.

2. Удосконалено методику оцінювання невизначеності вимірювання електроенергії за одним вимірювальним каналом вузла обліку, яка, на відміну від відомих, дозволяє оцінювати значення параметрів множини $L-R$ меж нечіткої функції для множини рівнів довіри, що характеризує точність обліку електроенергії.

3. Уточнено статичну характеристику вимірювального трансформатора струму електромагнітного типу при зниженому навантаженні вузла обліку

електроенергії лінійною регресійною моделлю, яка відрізняється від відомих універсальністю, оскільки характеризує вимірювальний перетворювач з довільним коефіцієнтом трансформації в межах заданого класу точності.

Практичне значення одержаних результатів та рекомендації щодо їх можливого використання

З практичної точки зору значення отриманих результатів полягає у наступному.

1. Запропонована математична модель для оцінювання невизначеності вимірювання електроенергії вузлом обліку в режимі зниженого навантаження дозволяє покращити метрологічні характеристики засобів обліку та підвищити точність вимірювання електроенергії.

2. Розроблено метод оцінювання точності обліку електроенергії за одним вимірювальним каналом вузла обліку в режимі зниженого навантаження, який дає змогу враховувати вплив на точність несиметричних струмів фаз навантаження.

3. Одержана універсальна статична характеристика вимірювального трансформатора струму електромагнітного типу забезпечує підвищення точності формування рахунків за електроенергію відповідно до показів лічильника трансформаторного підключення.

4. Розроблена прикладна комп'ютерна програма для оцінювання недообліку електроенергії через наявність режиму зниженого навантаження за значеннями робочих параметрів вузла обліку, використання якої дає змогу уточнити фінансові розрахунки між енергопостачальними компаніями та споживачами за спожиту електроенергію.

Одержані в дисертаційній роботі результати є важливими для підвищення точності вимірювання електроенергії вузлами обліку, уточнення енергоспоживання електротехнічних пристроїв, а також для покращення метрологічних характеристик засобів вимірювальної техніки, що функціонують у складі сонячних електростанцій. Це підтверджується впровадженням результатів дисертації на ТОВ «Сонячні стандартні рішення», ПрАТ «Науково-виробниче об'єднання «Київський завод автоматики». Також одержані результати є важливими для освіти, що підтверджено впровадженням у навчальний процес НАУ.

Оцінка змісту дисертації, її завершеність у цілому

Структура дисертації є обґрунтованою та логічно вмотивованою, включає чотири розділи з висновками по кожному розділу, загальні висновки, додатки, що доповнюють основний зміст дисертації.

У першому розділі «Сучасний стан методів та засобів вимірювання електричної енергії» авторка критично аналізує реалізацію принципу вимірювання електроенергії за допомогою лічильників різних типів: індукційних, статичних, цифрових та розумних. В результаті аналізу публікацій останніх років, багато з яких є закордонними, Василець К.С. встановлює тенденції розвитку інформаційно-вимірювальних систем обліку електроенергії. Зокрема, встановлено перехід від автоматизованих систем

комерційного обліку до передової вимірювальної інфраструктури, що дозволяє аналізувати параметри споживання електроенергії в реальному часі. Також встановлено, що масове впровадження розумних лічильників електроенергії перерозподіляє реалізацію задачі підтримання заданої точності обліку на програмний рівень. Для оцінювання невідповідної невизначеності результатів вимірювань в роботі запропоновано використовувати методи теорії нечітких чисел та множин. Авторка аргументує актуальність напрямку дослідження широким розповсюдженням режиму зниженого навантаження під час експлуатації вузлів обліку електроенергії. Спираючись на результати експериментальних досліджень, доводиться наявність суттєвого недообліку електроенергії під час існування такого режиму. В результаті аналізу літературних джерел встановлено, що у відомих дослідженнях приділено недостатньо уваги точності вимірювання електроенергії в режимі зниженого навантаження вузла обліку.

У *другому розділі* «Математичне моделювання невизначеності вимірювання електроенергії вузлом обліку при зниженому навантаженні» Василець К.С. обґрунтовує математичну модель, що дає змогу оцінити невизначеність вимірювання електроенергії при знижених первинних струмах вимірювальних трансформаторів. В основі моделі лежить використання метода суперпозиції, відповідно до якого вузол обліку подається сукупністю трьох вимірювальних каналів. При цьому відносну похибку трансформаторного вузла обліку електроенергії в режимі зниженого навантаження запропоновано обчислювати як середньозважене за струмами фаз відносно відхиленням за кожним вимірювальним каналом показів лічильника трансформаторного включення від лічильника прямого під'єднання. Для кожного з вимірювальних каналів запропоновано емпірично визначати оцінки параметрів множини нечітких функцій L-R типу для множини рівнів довіри. Для цього передбачається використовувати підхід до оцінювання невідповідної невизначеності з використанням теорії нечітких множин. В якості основних джерел невизначеності вимірювання електроенергії розглядаються вимірювальні трансформатори струму. Висунуто гіпотезу про можливість представлення статичної характеристики при зниженому навантаженні вузла обліку лінійною регресійною моделлю. Обґрунтована математична модель подана у вигляді нечіткої функції, що характеризує для заданих значень фазних струмів невизначеність вимірювання електроенергії трифазним вузлом обліку. Нечіткий інтервал, що описує результат вимірювання, визначається відповідно до функції приналежності нечіткої функції вузла обліку з урахуванням граничного рівня довіри.

У *третьому розділі* «Експериментальна ідентифікація значень параметрів математичної моделі для оцінювання невизначеності вимірювання електричної енергії» для лабораторного вузла обліку електроенергії, на основі емпіричних досліджень, Василець К.С. оцінено значення параметрів математичної моделі. Оброблення результатів експериментів здійснено за

допомогою програмного забезпечення, що самостійно розроблено авторкою. Для вимірювальних трансформаторів струму класу точності 0,5 S з використанням методів коваріаційного аналізу оцінено параметри статистичної моделі, що відповідає статичній характеристиці. Для кожного вимірювального каналу вузла обліку оцінено параметри множин нечітких функцій, що характеризують невизначеність вимірювання. З використанням метрологічних характеристик вимірювальних каналів одержано аналітичні вирази для нечіткої функції, що характеризує точність обліку трифазним вузлом обліку. Розроблено методiku оцінювання функції приналежності для такої нечіткої функції при заданих струмах фаз. Адекватність результатів математичного моделювання експериментальним даним підтверджена на основі порівняння результатів дослідів та математичного моделювання функціонування вузла обліку в режимі зниженого навантаження при несиметричних струмах фаз.

У *четвертому розділі* «Підвищення точності вимірювання електричної енергії вузлом обліку» авторкою запропоновано напрямки практичної реалізації комп'ютерно-орієнтованого метода оброблення вимірювальної інформації в режимі зниженого навантаження. Зокрема, Василець К.С. розробила прикладну комп'ютерну програму, яка, відповідно до значень робочих параметрів вузла обліку, оцінює найбільш можливий недооблік електроенергії та реальне споживання. Така програма може бути використана у складі автоматизованої системи обліку або передової вимірювальної інфраструктури, для вимірювального моніторингу вузла обліку сонячної електростанції, для оцінювання енергоефективності функціонування електротехнічних пристроїв. Результати вимірювань, що підтверджують неприпустимий рівень недообліку електроенергії, авторка пропонує використовувати в якості переконливого аргументу на користь необхідності технічного переоснащення вузла обліку або компенсації збурень.

Підсумки дисертації відображено у загальних висновках, які корелюють з висновками за кожним з розділів, розкривають досягнення мети і завдань досліджень та є достовірними.

Повнота викладення наукових положень, висновків і рекомендацій дисертації в опублікованих працях

Основні положення дисертаційного дослідження знайшли відображення у публікаціях Василець К.С., кількість яких відповідає чинним вимогам. Основні положення дисертації опубліковані у 17 друкованих працях, з них 3 – у фахових виданнях України (з яких 2 наукові праці – у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базі даних Scopus), 14 – матеріали і тези доповідей на конференціях. Проміжні та кінцеві результати публікувалися протягом 2020–2022 рр. Друковані праці вичерпне відображають наукові положення, висновки і рекомендації дисертації.

Слід відзначити, що здобувачка сформулювала цілісний науковий апарат дослідження, з належним визначенням його елементів: об'єкта, предмета, мети, завдань дослідження, які у процесі послідовного рішення

одержали вичерпні формулювання. Кожен розділ дисертації має власну наукову значущість, слугує науковим підґрунтям для наступного розділу та в результаті об'єднання усіх розділів формується цілісне наукове дослідження.

Відсутність (наявність) порушень академічної доброчесності

Аналіз дисертації та наукових публікацій Василиць Катерини Сергіївни, у яких висвітлено основні наукові результати дослідження, не дає підстав припускати, що в них мають місце порушення академічної доброчесності (академічний плагіат, самоплагіат, фабрикація, фальсифікація). У разі використання ідей, тверджень, відомостей із зовнішніх джерел інформації, у роботі є на них посилання, що відповідає нормам законодавства про авторське право та суміжні права.

Дискусійні положення та зауваження до змісту дисертації

Високо оцінюючи новизну, теоретичне та практичне значення дисертаційного дослідження, що рецензується, необхідно висловити наступні зауваження та побажання.

1. До 1 пункту наукової новизни слід додати: Встановлена закономірність зміни невизначеності обліку електроенергії від струму навантаження при зниженому навантаженні, яка має нелінійний характер.

2. В пункті 1 практичної цінності замість «...дозволяє покращити метрологічні характеристики засобів обліку та підвищити точність вимірювання електроенергії» слід написати «...дозволяє покращити метрологічні характеристики засобів обліку електроенергії за рахунок визначення значень невизначеності вимірювань електроенергії для заданих струмів навантаження при зниженому навантаженні».

3. Запропонована процедура ідентифікації метрологічних характеристик вузла обліку в режимі зниженого навантаження є доволі складною та об'ємною. Чи можливо оцінити типові характеристики для вузлів стандартної конфігурації, що найбільш широко використовуються на практиці?

4. В роботі здійснюється оцінювання характеристик трьох вимірювальних каналів, які використовуються для оцінювання точності обліку трифазним лічильником, відповідно до (2.46). Доцільним видається виконання перевірки можливості заміни трьох характеристик однією універсальною, як це було зроблено для вимірювальних трансформаторів струму. Цьому в роботі приділено недостатньо уваги. Така заміна дозволила б суттєво оптимізувати модель.

5. В табл. 3.2 наведено результати перевірки адекватності моделі у 8 дослідях. Підвищити надійність результатів аналізу можна було б шляхом збільшення кількості аналізованих точок.

6. Замість використання суми двох експонент (3.24) для апроксимації меж нечіткої функції, можливо було розбити її на декілька піддіапазонів, в кожному з яких здійснювати апроксимацію лінійними функціями.

7. Текст дисертації містить окремі орфографічні, стилістичні і друкарські помилки. Наприклад, стр. 31 «...сьогоднішній день..»; стр. 85 «...математична

моделі...»; «...для при конкретних...»; стр. 87 «...вимірювальних каналі...»; стр. 112 «...поліномів поліномів...»; тощо.

Зауваження до дисертації не знижують позитивної оцінки, проте можуть використовуватися під час дискусії на захисті дисертації, а також бути стимулом для подальшої наукової роботи авторки. Зміст роботи, логіка тексту, наукові та практичні результати свідчать про теоретичні знання, володіння методами наукових досліджень, уміння розв'язувати актуальні задачі.

Загальний висновок

Дисертаційне дослідження Василиць Катерини Сергіївни «Підвищення точності вимірювання електричної енергії в режимі зниженого навантаження» є теоретично і методологічно обґрунтованим, має безперечну наукову новизну, теоретичну і практичну значущість, є завершеним самостійним дослідженням.

Дисертація відповідає спеціальності 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка» та «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженому постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. №44, а її автор – Василиць Катерина Сергіївна – заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії у галузі знань 15 «Автоматизація та приладобудування» за спеціальністю 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка».

Рецензент

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри комп'ютеризованих
електротехнічних систем та технологій
Національного авіаційного університету



Сергій ФІЛОНЕНКО

