

ВІДГУК

опонента Заболотного Олександра Віталійовича
на дисертаційну роботу Костюкова Івана Олександровича
**«Розвиток методів контролю технічного стану електричної ізоляції за
параметрами ємності та тангенса кута діелектричних втрат»**
представлену на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
за спеціальністю 05.11.13 – прилади і методи контролю
та визначення складу речовин

Актуальність теми.

Актуальність теми дисертаційного дослідження визначається необхідністю забезпечення надійної роботи електротехнічного обладнання та електропостачання об'єктів інфраструктури.

Аналіз світових джерел показує, що однією з актуальних проблем сучасності є надання якісного та стабільного енергетичного постачання для клієнтів. Існує подальша тенденція до збільшення кількості кабельних ліній, що пов'язано зі зростанням кількості споживачів та їх енергетичних потреб. Фактично, надання енергетичних та інформаційних послуг реалізується шляхом уведення в експлуатацію нових ліній, а також використанням вже наявних відомчих кабельних ліній. Кабельні мережі відносяться до високовартісних, відповідальних систем з великим часом експлуатації. Надійне функціонування кабельних ліній особливо важливе для користувачів I та II категорій електроспоживання та зв'язку.

Нажаль, навіть для економічно розвинених країн частина вже прокладених ліній знаходиться на межі морального та фізичного зносу. Так, наприклад, на території одного штату США фіксується щомісячно від 12 до 20 масштабних виходів з ладу кабельних ліній живлення, що зривають забезпечення електроенергією одночасно для великої кількості споживачів. Порушення електрозабезпечення призводять до колосальних втрат в промисловості: відсутність електроживлення на підприємстві електронної промисловості на декілька хвилин веде до простою протягом тижня. В результаті, тільки по США аварійне

відключення електричної енергії внаслідок виходу з ладу кабельних ліній обходиться по різних оцінках від \$104 до \$164 мільярдів доларів на рік.

Враховуючи значну кількість аварійних ситуацій, що виникають в енергосистемі саме через пошкодження ізоляції електротехнічного обладнання у зв'язку з процесами її старіння під дією несприятливих експлуатаційних факторів, та пов'язану з економічними причинами неможливість заміни обладнання із зістареною ізоляцією на відповідні аналоги, розвиток методів контролю технічного стану електричної ізоляції електротехнічного обладнання набуває особливої актуальності. Електрична ємність та тангенс кута діелектричних втрат досить часто використовуються при вирішенні задач контролю технічного стану електричної ізоляції електротехнічного обладнання і значною мірою впливають на діагностичні параметри, отримані із застосуванням інших методів контролю. Тому вибраний в дисертаційній роботі напрямок досліджень, що полягає в аналізі та зменшенні впливу паразитних індуктивних та ємнісних параметрів досліджуваних шарів ізоляції на результати вимірювання електричної ємності та тангенса кута діелектричних втрат та вдосконаленні алгоритмів обробки сигналів струму та напруги при розрахунку параметрів діелектрика сприяє розвитку методів контролю технічного стану електротехнічного обладнання.

Актуальність теми роботи підтверджується її виконанням в рамках досліджень, проведених при роботі над госпдоговірними та держбюджетними науково-дослідними темами: «Дослідження ефективності технологічного контролю кабельно-провідникової продукції в умовах діючого виробництва з метою створення бази даних технологічного контролю і впровадження методів контролю для забезпечення гарантованого рівня бездефектності продукції», (ПАО «Завод «Південкабель», м. Харків), «Проведення аналітичних досліджень та розроблення науково-обґрунтованих пропозицій щодо визначення суттєвих експлуатаційних характеристик, порогових рівнів, класів та системи або систем оцінки та перевірки стабільності показників будівельної продукції категорії «Силові, контрольні кабелі і кабелі зв'язку» на замовлення Міністерства розвитку громад та територій України відповідно до наказу Мінрегіону від 09.04.2021 № 89, а також при виконанні теми

№: 0122U001297 «Застосування фізичного та математичного моделювання для підвищення стійкості авіаційно-космічної техніки та об'єктів критичної інфраструктури до дії потужних електромагнітних впливів».

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

Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі Костюкова І. О. базується на аналізі науково-технічних джерел інформації за даною проблемою, використанні сучасних методів дослідження, порівнянні отриманих в роботі результатів із результатами, отриманими шляхом використання інших методів, коректному використанні математичного апарату та засобів комп'ютерного моделювання.

Достовірність результатів досліджень.

Достовірність результатів дисертаційного дослідження визначається коректністю використаних при дослідженнях моделей смієсних об'єктів контролю та результатами статистичної обробки результатів вимірювань. Наукові результати здобувача успішно використані на підприємствах промисловості України.

До основних нових наукових результатів дисертації слід віднести наступне:

– вперше обґрунтовано підвищення завадостійкості визначення фазового зсуву між гармонічними сигналами струму та напруги із компонентами сторонніх шумів шляхом визначення декількох скалярних добутків досліджуваних сигналів із допоміжними тригонометричними функціями, значення частот яких дозволяють відокремлювати внесок ортогональних тригонометричних складових в розраховані частотні залежності скалярного добутку, завдяки чому розроблена модифікація кореляційного методу визначення фазового зсуву, що дає можливість збільшити завадостійкість визначення тангенсу кута діелектричних втрат для смієсних об'єктів контролю із зниженим рівнем добротності;

– вперше визначена умова відсутності фазового зсуву між кривими падіння напруги на резистивно заземленому досліджуваному шарі фазної ізоляції трьохжильного силового кабелю та заземлюючому резисторі, що дає можливість

розробити метод визначення часткових ємностей та відповідних значень тангенса кута діелектричних втрат шарів фазної ізоляції;

– вперше визначена умова ортогональності напруги на ємності та паразитній індуктивності ємнісного об'єкта контролю для його аперіодичного режиму розряду, що дало можливість розробити метод вимірювання паразитної індуктивності ємнісних об'єктів контролю;

– дістали подальшого розвитку способи обстеження трьохжильних силових кабелів при визначенні індивідуальних параметрів їх ізоляції на основі застосування сукупних вимірювань. Розроблена схема обстеження передбачає резистивно-ємнісне заземлення досліджуваного шару ізоляції та дозволяє спростити процедуру контролю у порівнянні із традиційними для кабельної техніки схемами обстеження, що використовуються при визначенні параметрів ізоляції шляхом застосування сукупних вимірювань;

– дістали подальшого розвитку засновані на використанні сукупних вимірювань методи визначення $\text{tg}\delta$ ізоляції трьохжильних силових кабелів, завдяки аналітичному вирішенню сформованої на основі теорії неоднорідних діелектриків системи лінійних алгебраїчних рівнянь відносно невідомих значень $\text{tg}\delta$, що дало можливість спростити процедуру контролю параметрів ізоляції за рахунок відмови від застосування чисельних методів.

Значимість отриманих результатів для науки і практичного використання.

Проведені в дисертаційній роботі дослідження дозволяють підвищити ефективність аналізу часових рядів результатів вимірювання електричної ємності та тангенса кута діелектричних втрат ємнісних об'єктів контролю, проводити визначення індивідуальних значень електричної ємності та тангенса кута діелектричних втрат шарів ізоляції трьохжильних силових кабелів в спільній металевій оболонці без застосування сукупних вимірювань, збільшити завадостійкість розрахунку тангенса кута діелектричних втрат для ємнісних об'єктів контролю із зниженим рівнем добротності, проводити визначення паразитної індуктивності ємнісних об'єктів контролю в режимі їх аперіодичного розряду.

Практичне значення отриманих в роботі результатів підтверджується їх використанням на підприємствах промисловості України.

Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях.

Основні положення та результати дисертаційної роботи опубліковані в 34 наукових працях, у тому числі 26 публікацій у періодичних виданнях, з яких 10 у виданнях, що індексовані в наукометричних базах Scopus та/або Web of Science, 16 у наукових фахових виданнях України, та 8 публікацій в матеріалах конференцій, з яких 4 індексовані в наукометричній базі Scopus.

Оцінка змісту дисертаційної роботи.

Дисертаційна робота Костюкова І. О. складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел із 330 найменувань та 4 додатків, в яких наведено список публікацій здобувача, використані при розрахунках програми, акти впровадження та опис типових об'єктів контролю та експериментального обладнання.

У вступі наведено інформацію щодо актуальності теми дисертаційного дослідження, показано його зв'язок з науково-дослідними темами, наведено перелік поставлених в дисертаційному дослідженні задач, сформульовано наукову повизну, описані використані методи дослідження та практичне значення отриманих результатів.

Перший розділ присвячено аналізу результатів наукових праць, в яких розглядається проблема контролю технічного стану електротехнічного обладнання. За результатами проведеного аналізу зроблено висновки про актуальність застосування методів контролю електричної ізоляції за параметрами її ємності та тангенса кута діелектричних втрат а також небажаний вплив паразитних індуктивних та ємнісних параметрів досліджуваних об'єктів контролю на результати вимірювання зазначених параметрів ізоляції. Відзначено актуальність вимірювання тангенса кута діелектричних втрат на основі застосування кореляційного методу визначення фазового зсуву, проведено аналіз недоліків сучасних алгоритмів цифрової обробки сигналів, що використовуються при обробці часових рядів результатів вимірювання параметрів діелектриків а також кривих

струму та напруги при розрахунку значень тангенса кута діелектричних втрат.

Другий розділ присвячено аналізу специфічних особливостей часових рядів результатів вимірювання електричної ємності та тангенса кута діелектричних втрат кабелів на основі витих пар. Показано, що до таких особливостей відноситься можливість протилежного впливу флуктуацій результатів вимірювання електричної ємності на відповідні значення тангенса кута діелектричних втрат. Так, для деяких флуктуацій електричної ємності їх вплив на відповідні значення тангенса кута діелектричних втрат відбувається у відповідності із їх функціональною залежністю для випадку паралельної схеми заміщення ємнісного об'єкта контролю, в той же час, в інших випадках такий вплив відбувається у відповідності із функціональною залежністю для послідовної схеми заміщення. Наведено аналіз факторів, що можуть призводити до описаної поведінки часових рядів.

Проведені в цьому розділі дослідження також сфокусовані на розробці методу зменшення розтікання спектру при аналізі часових рядів із застосуванням перетворення Фур'є та аналізі специфічних особливостей амплітудних спектрів часових рядів результатів вимірювання тангенса кута діелектричних втрат.

Третій розділ присвячено розробці модифікованого кореляційного методу визначення фазового зсуву, що може використовуватись при розрахунку тангенса кута діелектричних втрат ємнісних об'єктів контролю із зниженим рівнем добротності. Розроблена модифікація передбачає розрахунок декількох скалярних добутків досліджуваних сигналів струму та напруги із дономіжними тригонометричними функціями, що мають частоти, значення яких вибираються із умови усунення впливу ортогональних тригонометричних складових в частотну характеристику розрахованого скалярного добутку.

В розділі також проведено аналіз основних факторів, що зумовлюють систематичну похибку розробленої модифікації кореляційного методу. Показано, що до таких факторів належать невідоме, для випадку наявності в сигналі адитивної компоненти шуму, значення його амплітуди а також характер представленої у вигляді затухаючих коливань функції, що використовується для розрахунку початкових фаз кривих струму та напруги. З метою пошуку найбільш дієвих шляхів

усунення похибки, що викликана невідомим значенням амплітуди досліджуваних сигналів, проведено порівняльний аналіз завадостійкості алгоритмів апроксимації еліпсу, заснованих на застосуванні методу найменших квадратів та запропонованого способу визначення амплітуди, що базується на припущенні, згідно з яким досліджуваний сигнал з адитивною компонентою білого шуму має таке саме значення коефіцієнту амплітуди як і синусоїдальний сигнал без компоненти шуму. Результати проведеного порівняльного аналізу засвідчили більш високий рівень точності та простоту практичної реалізації запропонованого способу визначення амплітуди у порівнянні із розглянутими, та заснованими на застосуванні методу найменших квадратів алгоритмами. Також в розділі наведено обґрунтування вибору частот допоміжних тригонометричних функцій, з якими розраховується скалярний добуток досліджуваних сигналів струму та напруги. Описаний спосіб вибору частот дозволяє усунути джерело систематичної похибки розрахунку початкової фази, що зумовлене характером представленої у вигляді затухаючих коливань функції, що використовується при її розрахунку.

Четвертий розділ присвячено аналізу особливостей визначення індивідуальних значень електричної ємності та тангенса кута діелектричних втрат шарів ізоляції трьохжильних силових кабелів в спільній металевій оболонці із застосуванням сукупних вимірювань.

Показано, що до таких особливостей відноситься існування кореляційного зв'язку між результатами вимірювання сукупних значень електричної ємності, що отримані із застосуванням різних схем з'єднання електропровідних елементів конструкції силового кабелю. Крім того, в розділі наведено аналітичне вирішення сформованої на основі теорії неоднорідних діелектриків системи рівнянь відносно індивідуальних значень тангенса кута діелектричних втрат кожного з шарів ізоляції трьохжильних силових кабелів з паперовою імпрегнованою ізоляцією в спільній металевій оболонці.

П'ятий розділ присвячено розробці модифікованих схем з'єднання електропровідних елементів конструкції при обстеженні ізоляції трьохжильних силових кабелів. Розроблена схема з'єднання передбачає резистивно-ємнісне

заземлення досліджуваного шару ізоляції. На основі розробленої схеми в розділі проведено обґрунтування методу вимірювання часткових ємностей та відповідних значень тангенса кута діелектричних втрат шарів ізоляції між жилами трьохжильних силових кабелів. Розроблений метод адаптовано для визначення часткових ємностей ємнісних об'єктів контролю із 3 електродами.

В шостому розділі проведено аналіз впливу паразитної індуктивності ємнісних об'єктів контролю на результати вимірювання їх ємності та тангенса кута діелектричних втрат при застосуванні вимірювальних схем, побудованих на застосуванні перетворювачів напруги в струм. Також в розділі розроблено метод вимірювання паразитної індуктивності ємнісних об'єктів контролю в режимі їх аперіодичного розряду.

Список використаних джерел достатньо повний та охоплює сучасні вітчизняні та зарубіжні публікації.

Зміст автореферату відображає основний зміст дисертації та розкриває внесок здобувача в наукові результати та практичне значення роботи.

По дисертаційній роботі можна зробити наступні зауваження:

1. В підрозділі 2.1 рукопису опис об'єктів дослідження наведено у стислій формі: не вказано тип або типи витої пари, довжину і діаметр дослідних зразків, кількість струмопровідних жил; не наведено схеми підключення засобів вимірювання до об'єкту дослідження, композицію вимірювальної установки або вимірювального стенду.

2. Необхідно пояснити інформативність рисунку 2.9 в другому розділі рукопису, адже він демонструє типову поведінку середнього арифметичного за умови зростання кількості окремих спостережень вимірюваної величини.

3. У підрозділі 2.2. відсутній детальний формалізований підхід до формування кількості N_s елементів вибірки досліджуваного сигналу.

4. Необхідно пояснити доцільність використання терміну «еліпс розсіювання», адже еліпс розсіювання наряду із прямокутником розсіювання використовують для аналізу властивостей двомірних випадкових величин, а в рукописі, як я розумію,

йдеться про апроксимацію еліпса як фігури Ліссажу, утвореної двома гармонійними сигналами різної фази і частоти.

5. Стосовно рисунку 13 в авторефераті і рисунку 4.10 в рукописі, вважаю недоцільним наводити гістограму розподілу значень тангенса кута діелектричних втрат шару ізоляції через невелику ($N = 26$) кількість спостережень. Її слід замінити інтервальною оцінкою на зразок розширеної невизначеності.

6. Слід зазначити необхідність урахування точності перетворення для аналогового помножувача сигналів AD633 через низьку стабільність статичної характеристики перетворення подібних мікросхем.

7. Представлені в рукописі результати вимірювань електричної ємності та тангенса кута діелектричних втрат отримані для частот, значення яких дорівнює 1000 Гц або 100 Гц, тому необхідно надати оцінку адекватності отриманих результатів для робочих умов, коли кабельні лінії живлення працюють на промисловій частоті, і надати пояснення, чому обрано саме такі частоти.

Зазначені недоліки не впливають на загальну позитивну оцінку виконаної роботи.

Висновок

Дисертаційна робота Костюкова Івана Олександровича «Розвиток методів контролю технічного стану електричної ізоляції за параметрами ємності та тангенса кута діелектричних втрат» за своїм змістом відповідає паспорту спеціальності 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин. Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, яка у розв'язує важливу наукову проблему, суть якої полягає в зменшенні впливу паразитних індуктивних та ємнісних параметрів досліджуваних шарів ізоляції на результати контролю її технічного стану за параметрами ємності та тангенса кута діелектричних втрат. Дисертація «Розвиток методів контролю технічного стану електричної ізоляції за параметрами ємності та тангенса кута діелектричних втрат» Костюкова І.О.

виконана із дотриманням принципів академічної доброчесності. Дисертаційна робота відповідає вимогам п.п. 7, 8, 9 «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 року № 1197, а здобувач Костокова Іван Олександрович, заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин.

Опонент

декан факультету систем управління
літальних апаратів Національного
аерокосмічного університету імені М.Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»
доктор технічних наук, доцент

30.08.2023



Олександр ЗАБОЛОТНИЙ



Відом надійшов «11» 09 2023 р.
Вчений секретар спец. ради 264.030.09
Сергій ЛЬВОВ