

## ВІДГУК

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

**Актуальність теми дисертації.** Надійність роботи та безпека експлуатації енергетичного обладнання в значній мірі залежить від стану електричної ізоляції. З часом під дією різних, як зовнішніх так і внутрішніх факторів діелектричні властивості ізоляції погіршується, що призводить до старіння ізоляції і як наслідок виникнення аварійних ситуацій у енергетичній мережі та відмов в роботі енергетичного обладнання.

При цьому потрібно зазначити, що значна кількість дефектів електричної ізоляції, які виникають в процесі її експлуатації можуть бути виявлені під час контролю параметрів електричної ємності та тангенса кута діелектричних втрат ( $\text{tg}\delta$ ). Значення тангенсу кута діелектричних втрат ( $\text{tg}\delta$ ) та електричної ємності (С) основної ізоляції. Це найбільш важливі діагностичні критерії, так як вони безпосередньо пов'язані з основними характеристиками ізоляції – діелектричними втратами та діелектричною проникністю. При цьому електрична ємність визначається поляризаційними процесами в ізоляційному матеріалі, а значення  $\text{tg}\delta$  дає усереднену об'ємну характеристику стану діелектрика. Однак існуючі методи контролю технічного стану електричної ізоляції за параметрами ємності та тангенса кута діелектричних втрат та засоби, що їх реалізують на сьогоднішній день мають незадовільний рівень завадостійкості до впливу паразитних параметрів та зовнішніх факторів.

Тому розвиток завадостійких методів контролю технічного стану електричної ізоляції за параметрами її електричної ємності та тангенса кута діелектричних втрат є актуальною науково-технічною проблемою пов'язаною із забезпеченням надійності та безпечності функціонування електроенергетичного обладнання. Саме вирішенню цієї проблеми і присвячена дисертаційна робота *Костюкова Івана Олександровича*

Актуальність дисертаційної роботи також підтверджено дослідженнями, які проводились на кафедрі електроізоляційної та кабельної техніки НТУ «ХП». Здобувач брав участь в дослідженнях, проведених за 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), та «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, в яких здобувач був виконавцем окремих етапів, 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 отриманих у роботі наукових положень, висновків і рекомендацій базується на коректній постановці мети і задач дослідження, аналізі об'єкта досліджень, використанні теоретичних і експериментальних методів в області вимірювання електричного імітансу та інших фізичних величин, чіткому формулюванню отриманих результатів.

Сукупність отриманих результатів дозволила розвинути апарат вирішення актуальної науково-технічної проблеми, що полягає у забезпеченні підвищеної завадостійкості засобів контролю технічного стану електричної ізоляції електроенергетичного обладнання за рахунок удосконалення методів визначення основних контрольно-діагностичних ознак (електричної ємності та тангенса кута діелектричних втрат), які значним чином характеризують експлуатаційні параметри електричної ізоляції.

Теоретичні дослідження виконано з використанням сучасного математичного апарату, фізичних явищ, які мають місце при розповсюдженні акустичних хвиль в об'єктах дослідження.

Достовірність результатів теоретичних досліджень підтверджується результатами відповідних експериментів та результатами впроваджень. Отримані результати перевірені шляхом критичних переходів отриманих формул до відомих раніше видів, що підтверджує обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі результатів дослідження.

### **Достовірність результатів досліджень.**

Достовірність результатів дисертаційного дослідження забезпечується коректністю постановок математичних задач, застосуванням стандартних процедур математичного аналізу й методів математичної фізики, відповідністю змісту математичних конструкцій фізичній суті описуваних процесів. Наукові

результати здобувача успішно використані під час удосконалення існуючих методів контролю стану електричної ізоляції за параметрами ємності та тангенса кута діелектричних втрат на підприємствах енергетичної галузі України.

**Новизна наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації.**

Основні наукові положення, висновки і рекомендації, отримані в дисертаційній роботі, прямо пов'язані з метою досліджень і задачами, що вирішувалися для її досягнення. Отримані такі нові найбільш значущі наукові результати:

– 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 тангенса кута діелектричних втрат для ємнісних об'єктів контролю із зниженим рівнем добротності;

- 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

- отримали подальший розвиток:

- засновані на застосуванні сукупних вимірювань методи визначення індивідуальних значень тангенса кута діелектричних втрат ( $\text{tg}\delta$ ) кожного з шарів ізоляції трьохжильних силових кабелів в спільній металевій оболонці. Зазначений розвиток полягає в аналітичному вирішенні сформованої на основі теорії неоднорідних діелектриків системи алгебраїчних рівнянь відносно невідомих індивідуальних значень  $\text{tg}\delta$  для випадку, коли сукупні значення  $\text{tg}\delta$  визначаються із використанням 3 схем обстеження, що передбачають з'єднання 2 жил та оболонки силового кабелю та 3 схем обстеження, що передбачають з'єднання 1 жили та оболонки.

- схеми з'єднання електропровідних елементів при обстеженні трьохжильних силових кабелів в спільній металевій оболонці. Розроблена схема з'єднання передбачає резистивно-ємнісне заземлення досліджуваного шару ізоляції і з'єднання з оболонкою однієї із жил кабелю та дозволяє сформуванню системи рівнянь відносно невідомих значень електричної ємності та  $\text{tg}\delta$  досліджуваного шару ізоляції.

### **Значимість отриманих результатів для науки і практичного використання.**

Значимість отриманих результатів полягає у розробці модифікованого кореляційного методу вимірювання фазового зсуву, застосування якого дає можливість збільшити завадостійкість визначення  $\text{tg}\delta$  для об'єктів контролю з незначним рівнем добротності; розробці методу визначення індивідуальних параметрів ізоляції трьох-жильних силових кабелів без застосування сукупних вимірювань та адаптації розробленого методу для ємнісних об'єктів контролю із трьох-затискною схемою вимірювання; наданні апарату задля формулювання особливостей числових рядів результатів вимірювання електричної ємності та тангенса кута діелектричних втрат ізоляції. Отримані результати є основою для реалізації завадостійких засобів контролю технічного стану електричної ізоляції за параметрами ємності та тангенса кута діелектричних втрат.

Окрім того, результати дисертаційної роботи впроваджені у:

– ТОВ «ООВ «Сертатом» (м. Харків) в засобах визначення індивідуальних значень електричної ємності та  $\text{tg}\delta$  ізоляції трьохжильних силових кабелів в спільній металевій оболонці;

– ДП «Завод «Електроважмаш» (м. Харків) та Українська асоціація «Укрелектрокабель» (м. Київ) в методах аналізу часових рядів результатів вимірювання електричної ємності та  $\text{tg}\delta$ ;

– технічному комітеті № 131 «Електроізоляційна та кабельна техніка» Держспоживстандарту України (м. Харків) під час забезпечення гармонізації Європейських та Українських стандартів в галузі електроізоляційної та кабельної техніки.

Все це підтверджує наукову і практичну цінність результатів виконаної дисертаційної роботи.

### **Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях.**

Результати дисертації опубліковано у 34 наукових публікаціях, з них: 26 статей у періодичних виданнях, з яких 10 у виданнях, внесених до наукометричних баз SCOPUS та/або Web of Science, 16 статей в наукових фахових виданнях України, 8 в збірниках матеріалів конференцій, з яких 4 індексовані в наукометричній базі SCOPUS.

### **Оцінка змісту дисертаційної роботи.**

Дисертаційна робота Костюкова І.О. складається із анотації і списку публікацій за темою дисертації українською та англійською мовами, вступу, 6 розділів, висновків та 4 додатків. Повний обсяг дисертації становить 317 сторінок.

У *вступі* обґрунтовані актуальність теми дисертації, мета і завдання дослідження, наукова новизна і практичне значення отриманих результатів роботи, показаний особистий внесок здобувача, представлена інформація по апробації і публікації результатів дисертації, реалізація і впровадження основних положень роботи.

У *першому* розділі дисертаційної роботи на основі критичного аналізу фізичних моделей старіння електричної ізоляції під дією несприятливих експлуатаційних факторів, найбільш розповсюджених методів контролю ізоляції силових кабелів шляхом застосування імпульсів високої напруги, вимірювання рівня часткових розрядів, абсорбційних методів контролю, вимірювання її електричної ємності та тангенса кута діелектричних втрат, а також методів теорії цифрової обробки сигналів, що використовуються як при аналізі числових рядів отриманих результатів вимірювання так і безпосередньо у системах вимірювання ємності та тангенса кута діелектричних втрат сформульовано основні задачі дисертаційного дослідження.

У *другому* розділі проведено дослідження специфічних особливостей часових рядів результатів вимірювання електричної ємності та  $\text{tg}\delta$  а також формуванню шляхів зменшення впливу розтікання спектру при їх спектральному аналізі. Визначені специфічні особливості часових рядів сформульовані для екранованих та неекранованих кабелів на основі витої пари. Проведено спектральний аналіз числових рядів результатів вимірювання тангенса кута діелектричних втрат та показано, що застосування запропонованого вибору частот допоміжних тригонометричних функцій за якими розкладається досліджуваний сигнал дозволяє вдвічі збільшити роздільну здатність перетворення Фур'є без традиційного доповнення досліджуваної числової послідовності нулями та вдвічі зменшити кількість необхідних розрахунків, за рахунок відмови від розкладання досліджуваного сигналу із застосуванням повної системи ортогональних тригонометричних функцій.

У *третьому* розділі розроблено модифікацію кореляційного методу визначення фазового зсуву для розрахунку  $\text{tg}\delta$  ємнісних об'єктів контролю із зниженим рівнем добротності. Розроблена модифікація передбачає окреме визначення початкових фаз кривих струму та напруги шляхом розрахунку декількох їх скалярних добутків із допоміжними синусоїдальними функціями з частотами, значення яких вибираються виходячи з умови, що дозволяє відокремити внесок ортогональних тригонометричних складових в розраховані

значення скалярного добутку. Результати порівняльного аналізу завадостійкості показали, що у порівнянні із традиційним кореляційним методом вимірювання фазового зсуву розроблена модифікація дозволила підвищити завадостійкість вимірювання фазового зсуву між кривими струму та напруги та, відповідно, тангенса кута діелектричних втрат в діапазоні значень від  $0^\circ$  до  $45^\circ$ . В той же час, в діапазоні від  $45^\circ$  до  $90^\circ$  класичний кореляційний метод вимірювання фазового зсуву має вищий рівень завадостійкості у порівнянні із його розробленою модифікацією.

У *четвертому* розділі проаналізовано особливості вимірювання індивідуальних параметрів діелектриків кожного з шарів ізоляції в трьохжильних силових кабелях. Показана можливість існування кореляційних зв'язків між результатами вимірювань сукупних значень електричної ємності, що були отримані при застосуванні різних способів з'єднання електропровідних елементів конструкції силового кабелю. Проаналізовано складові дисперсії результатів вимірювання часткових ємностей ізоляції трьохжильних силових кабелів та отримано формули для прямого розрахунку значень тангенса кута діелектричних втрат із застосуванням сукупних вимірювань.

У *п'ятому* розділі на основі модифікованих схем з'єднання електропровідних елементів, розроблено методику вимірювання електричної ємності та  $\text{tg}\delta$  кожного з шарів його ізоляції. Розроблена модифікація існуючих схем обстеження передбачає резистивне, або резистивно-ємнісне заземлення досліджуваного шару ізоляції. Визначення невідомих параметрів ізоляції проводиться шляхом регулювання величини електричного опору, через який заземлено досліджуваний ізоляційних прошарок, до моменту нульового фазового зсуву між напругою на досліджуваному шарі ізоляції та на його заземлюючих елементах із наступним вимірюванням цих напруг.

У *шостому* розділі: для вимірювальної схеми на основі перетворювача напруги в струм та фазового детектору проведено теоретичний аналіз впливу паразитної індуктивності досліджуваного ємнісного об'єкта контролю на результати вимірювання електричної ємності та тангенса кута діелектричних втрат, наведено рішення щодо розробки схем для зсуву фази гармонічних сигналів на  $90^\circ$ , розроблено методику оцінювання паразитної індуктивності ємнісних об'єктів контролю для їх аперіодичного режиму розряду

*Висновки* до розділів та за результатами роботи сформульовані достатньо чітко і виразно та відповідають змісту дисертаційної роботи

Список використаних джерел досить повний і охоплює сучасні вітчизняні та зарубіжні публікації із 330 найменувань.

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

**Зміст дисертаційної роботи** цілком відповідає

– профілю спеціалізованої вченої ради Д 64.050.09 та паспорту спеціальності 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин, формулі спеціальності і напрямам досліджень:

1. Технічні засоби для систем контролю й захисту технічного стану об'єктів.
2. Прилади контролю надійності промислового обладнання і передаварійних ситуацій.
3. Прилади неруйнівного контролю матеріалів і виробів.

**Використання в докторській дисертації результатів наукових досліджень, на основі яких захищено кандидатську дисертацію.**

Результати наукових досліджень, за якими Костюков І.О. у 2015 році захистив дисертаційну роботу за темою: «Метод контролю ефективної магнітної проникності феромагнітного спірального дроту броні силових кабелів» на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин, не виносяться на захист даної докторської дисертації.

**Оформлення дисертації.**

Дисертація написана на високому науково-професійному рівні, містить важливі наукові положення, що характеризуються новизною і корисністю, а також практичні результати, що знайшли застосування на підприємствах як України, так і за кордоном. Рівень наукових досліджень та глибина розглянутих задач дозволяє оцінити роботу як таку, що відповідає вимогам, які пред'являються до докторських дисертацій.

Оформлення дисертаційної роботи відповідає вимогам наказу МОН України № 40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження вимог щодо оформлення дисертації».

**Зауваження по дисертаційній роботі та автореферату.**

1. Досліджені в дисертації типи силових кабелів в реальних умовах експлуатації працюють за значно більш високих значень прикладеної до їх ізоляції напруги (наприклад, за рівнів 6 кВ, 10 кВ...) ніж значення, за яких проводились наведені в роботі результати вимірювань. Відомо, що за наявності часткових розрядів, що неминуче виникають в реальних умовах експлуатації силових кабелів, електрична ємність та тангенс кута діелектричних втрат діелектриків є нелінійними функціями від рівня прикладеної напруги. В той же час, в дисертації не наведено інформації, за допомогою якої можна проводити співставлення отриманих за низьких значень випробувальних напруг значень

ємності та тангенса кута діелектричних втрат із відповідними значеннями за рівнів напруг, що відповідають реальним умовам експлуатації силових кабелів.

2. В роботі проаналізовано значну кількість методів вимірювання електричної ємності та тангенса кута діелектричних втрат. В той же час, в роботі не наведено жодної аргументації, чому аналіз впливу паразитної індуктивності ємнісних об'єктів контролю не результати вимірювання ємності та тангенса кута діелектричних втрат необхідно проводити саме для наведеної на Рис. 6.3 схеми.

3. В роботі детально розглянуті методи вимірювання ємності, їх реалізації та недоліки для застосування під час визначення діагностичних параметрів електричної ізоляції, але методи визначення ємності на основі компенсаційно-мостових схем, використання яких дозволяє уникнути багатьох похибок.

4. Згідно із наведеними на Рис. 3.26 результатами, в роботі проведено порівняльний завадостійкості кореляційного методу визначення фазового зсуву та розробленого в Розділі 3 алгоритму. Для розробленого алгоритму таке порівняння було доцільно провести також із іншими відомими методами визначення фазового зсуву.

5. Значну частину Розділу 2 присвячено розробці шляхів зменшення впливу явища розтікання спектру на результати аналізу часових рядів із застосуванням перетворення Фур'є. До недоліків проведених в цьому розділі досліджень необхідно віднести відсутність порівняльного аналізу ефективності описаного методу із іншими, відомими з теорії цифрової обробки сигналів методами (застосування віконних функцій або інтерполяційних алгоритмів).

6. В дисертації та авторефераті зустрічається некоректне вживання деяких термінів, наприклад терміну "контролю із 3 електродами" та "3 клемми" більш усталене в теорії інформаційно-вимірювальної техніки поняття "трьох-затискна схема вимірювання" (стр. 53 дисертації та стр.3, 27 автореферат), "нормально розподілені", а треба "мають нормальний закон розподілу" (стр. 136 дисертації)

7. У ряді наведених формул відсутній аргумент аналітичних виразів, наприклад: формула 2.17 та 3.7 дисертації. В формула 3.1-3.2 стр.120 дисертації замість індексу  $k$  є правильним використання  $t_k$ . Для формул 2.18-2.23 стр. 82 дисертації не вказано величини  $\theta_1, \theta_2, \phi$ .

8. У матеріалах розділу 6 розміщені принципові схеми реалізації компонентів наведених в блок-схемах, які більш доцільно було б розмістити в додатках.

9. В тексті автореферату зустрічаються деякі орфографічні, стилістичні та граматичні помилки.

Зазначені зауваження не є принциповими і не піддають сумніву результати досліджень та не впливають на загальну позитивну оцінку дисертації Костюкова І.О., її наукову новизну і практичну цінність.

