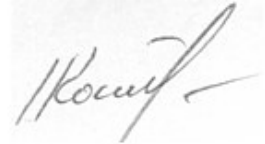


**Міністерство освіти і науки України  
Національний технічний університет  
“Харківський політехнічний інститут”**

**КОСТЮКОВ ІВАН ОЛЕКСАНДРОВИЧ**



УДК 621.315.2: 621.317.335.2

**РОЗВИТОК МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ  
ЕЛЕКТРИЧНОЇ ІЗОЛЯЦІЇ ЗА ПАРАМЕТРАМИ ЄМНОСТІ ТА  
ТАНГЕНСА КУТА ДІЕЛЕКТРИЧНИХ ВТРАТ**

спеціальність 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення  
складу речовин

Реферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Харків–2023

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі електроізоляційної та кабельної техніки Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України.

**Науковий консультант:** доктор технічних наук, професор  
**Безпрозваних Ганна Вікторівна**,  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»,  
професор кафедри електроізоляційної та кабельної  
техніки

**Опоненти:** доктор технічних наук, доцент  
**Заболотний Олександр Віталійович**,  
Національний аерокосмічний університет імені  
М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний  
інститут», декан факультету систем управління літа-  
льних апаратів;

доктор технічних наук, старший  
науковий співробітник  
**Зайцев Євген Олександрович**,  
Інститут електродинаміки НАН України, м. Київ,  
завідувач відділу теоретичної електротехніки та  
діагностики електротехнічного обладнання;

доктор технічних наук, професор  
**Плюгін Владислав Євгенович**,  
Харківський національний університет міського гос-  
подарства імені О.М. Бекетова, завідувач кафедр-  
и систем електропостачання та електроспоживання  
міст.

Захист відбудеться «28» вересня 2023 р. о 14<sup>30</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.09 у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2, Ректорський корпус (аудиторія 28).

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

Сергій ЛЬВОВ

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Науково-технічна проблема контролю технічного стану електричної ізоляції електроенергетичного обладнання, в першу чергу, зумовлена необхідністю забезпечення надійного енергопостачання об'єктів інфраструктури та побутових споживачів. Внаслідок багатьох техніко-економічних факторів, що ускладнюють його заміну на аналогічне устаткування із не зістареною під дією експлуатаційних факторів ізоляцією, значна кількість обладнання використовується в енергосистемах вже після закінчення нормативного строку експлуатації. Так, згідно із відомими статистичними даними майже 45% кабельних мереж знаходяться в експлуатації більше 30 років.

З точки зору інформативності щодо ступеню старіння ізоляції та, відповідно, актуальності свого подальшого розвитку, значний інтерес становлять класичні методи контролю за параметрами електричної ємності та тангенса кута діелектричних втрат ( $\text{tg}\delta$ ). Зазначена актуальність застосування зазначених параметрів ізоляції в задачах контролю її технічного стану зумовлена їх значним впливом на показники якості діелектриків, отримані шляхом використання інших, поширених на практиці, методів контролю. Так, електрична ємність визначається поляризаційними процесами в ізоляційному матеріалі і тому значною мірою впливає на діагностичні параметри, отримані із застосуванням таких абсорбційних методів контролю, як метод відновлюваної напруги, а також при визначенні якості діелектричних матеріалів шляхом застосування коефіцієнтів (абсорбції та індексу поляризації), що характеризують швидкість зміни струму через діелектрик при подачі на нього постійної напруги. Крім того, в багатьох випадках значення електричної ємності використовується в якості допоміжного параметру при розрахунку  $\text{tg}\delta$ . В той же час, значення  $\text{tg}\delta$  ізоляції є чутливим до рівня її часткових розрядів, ступеню зволоження та теплового старіння а також демонструє значну кореляцію із механічними властивостями діелектриків.

Для багатьох поширених на практиці ємнісних об'єктів контролю визначення електричної ємності та  $\text{tg}\delta$  суттєво ускладнені внаслідок небажаного впливу їх паразитних ємнісних та індуктивних параметрів на результати вимірювань, а також через недоліки існуючих алгоритмів цифрової обробки кривих струму та напруги, що застосовуються при розрахунку параметрів діелектрика. Вирішення викликані цими недоліками проблеми розвитку методів контролю електричної ізоляції за параметрами електричної ємності та  $\text{tg}\delta$  визначило напрямок дисертаційного дослідження.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконана на кафедрі електроізоляційної та кабельної техніки НТУ «ХПІ». 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 харак-

теристик, 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».

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є теоретичний розвиток та вдосконалення методів контролю технічного стану ізоляції ємнісних об'єктів контролю за параметрами їх електричної ємності та тангенса кута діелектричних втрат.

Для досягнення мети в роботі поставлені задачі:

- на основі аналізу сучасного етапу розвитку приладів та методів контролю технічного стану ізоляції електроенергетичного та телекомунікаційного обладнання сформулювати основні проблеми, що ускладнюють практичне застосування існуючих методів контролю та визначити напрямки їх вирішення;
- розробити метод визначення паразитної індуктивності ємнісного об'єкта контролю шляхом аналізу кривих струму для випадку аперіодичного режиму розряду об'єкта контролю;
- розробити завадостійку модифікацію кореляційного методу вимірювання фазового зсуву для визначення тангенса кута діелектричних втрат об'єктів контролю із зниженим рівнем добротності;
- визначити складові дисперсії результатів вимірювання індивідуальних значень часткових ємностей шарів ізоляції в трьохжильних силових кабелях у спільній металевій оболонці із застосуванням сукупних вимірювань;
- розробити метод визначення електричної ємності та  $\text{tg}\delta$  шарів міжфазної ізоляції трьохжильних силових кабелів у спільній металевій оболонці на основі резистивно-ємнісного заземлення досліджуваного шару діелектрика;
- адаптувати розроблений для трьохжильних силових кабелів в спільній металевій оболонці та заснований на резистивно-ємнісному заземленні досліджуваного шару ізоляції метод визначення електричної ємності та  $\text{tg}\delta$  для ємнісних об'єктів контролю із трьома електродами;
- проаналізувати характерні особливості часових рядів результатів вимірювання електричної ємності та тангенса кута діелектричних втрат ізоляції кабелів на основі витих пар.

**Об'єктом дослідження** є процес взаємодії діелектриків із електричним полем, що дозволяє сформувати чутливі до ступеня старіння діелектрика діагностичні параметри.

**Предмет дослідження** – методи та прилади контролю технічного стану електричної ізоляції на основі значень її електричної ємності та  $\text{tg}\delta$ .

**Методи дослідження.** При розробці модифікованого кореляційного методу вимірювання фазового зсуву використовувались статистичні методи та методи теорії цифрової обробки сигналів. Визначення параметрів ізоляції досліджуваних зразків силових та телекомунікаційних кабелів проводилось із застосуван-

ням результатів теорії фізики діелектриків, спектральних методів та методів регресійного аналізу. Розробка методу визначення паразитної індуктивності ємнісних об'єктів контролю для випадку їх аперіодичного режиму розряду проведена на основі використання теорії лінійних електричних ланцюгів.

**Наукова новизна отриманих результатів:**

– 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 ємнісних 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.

**Практичне значення отриманих результатів** для електроізоляційної та кабельної техніки полягає в 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 трьохжильних силових кабелів без застосування сукупних вимірювань та адаптації розробленого методу для ємнісних об'єктів контролю із 3 електродами. Формулюванні особливостей числових рядів результатів вимірювання електричної ємності та тангенса кута діелектричних втрат.

Основні результати роботи впроваджені:

– ТОВ «ООВ «Сертатом» (м. Харків) – для 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) – для аналізу часових рядів результатів вимірювання електричної ємності та  $\text{tg}\delta$ ;

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

**Особистий внесок здобувача.** Положення і результати, що виносяться на захист дисертаційної роботи, отримані здобувачем особисто. Серед них: розробка модифікованого кореляційного методу вимірювання фазового зсуву для збільшення завадостійкості визначення  $\text{tg}\delta$  об'єктів контролю з низьким рівнем добротності, розробка методу вимірювання паразитної індуктивності ємнісного об'єкту контролю при його аперіодичному розряді, аналіз отриманих результатів, розробка методу вимірювання параметрів фазної ізоляції трьохжильних силових кабелів з паперовою ізоляцією, моделювання впливу паразитної індуктивності ємнісних об'єктів контролю на результати вимірювання їх електричної ємності та  $\text{tg}\delta$ .

**Апробація результатів дисертації.** Основні наукові результати та положення дисертаційної роботи доповідались, обговорювались та були схвалені на: 26, 27 та 28 Міжнародних конференціях «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (м. Харків, 2018 р, 2019 р, 2021 р), III Міжнародній науково-технічній конференції «Енергоефективність та енергетична безпека електроенергетичних систем» (м. Харків, 2019 р.), Міжнародному симпозіумі «Проблеми електроенергетики, електротехніки та електромеханіки» (SIEMA) (м. Харків, 2020 р, 2022 р.), та на Міжнародних конференціях, збірники статей яких проіндексовані в наукометричній базі SCOPUS: Second International Conference on Emerging Electrical Energy, Electronics and Computing Technologies (ICERCT), (м. Малакка, 2020 р.), Second International Conference on Robotics, Electrical and Signal Processing Techniques (ICREST), (м. Дака, 2021 р.), I та III міжнародних конференціях IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek) (м. Харків, 2020 р, 2022 р.).

**Публікації.** Основний зміст дисертації відображено 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.

**Структура й обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг дисертації становить 317 сторінок; з них 64 рисунка по тексту; 36 рисунків на 18 окремих сторінках; 13 таблиць по тексту; 6 таблиць на 2 окремих сторінках, список використаних джерел з 330 найменувань на 36 сторінках, 4 додатки на 19 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність проблеми контролю технічного стану електричної ізоляції електроенергетичного та телекомунікаційного обладнання, показано зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами, планами, темами, сформульовано мету дослідження та поставлено необхідні для її досягнення задачі. Наведено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, охарактеризовано особистий внесок здобувача в отриманні результати дослідження, наведено інформацію щодо публікацій та апробації роботи а також про використанні при вирішенні поставлених в дисертаційній роботі задач методи дослідження.

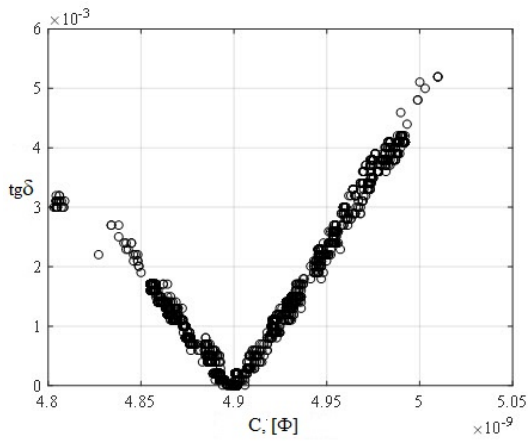
**Перший розділ** присвячено аналізу сучасного стану розвитку методів контролю технічного стану електричної ізоляції електроенергетичного та телекомунікаційного обладнання.

Показано, що більшість з наукових праць сфокусовано на розвитку методів визначення технічного стану за параметрами часткових розрядів та об'ємних зарядів, вдосконаленні методів контролю, побудованих на використанні абсорбційних явищ в діелектриках, визначенню ступеню розвитку водних трієнгів шляхом застосування діелектричної спектроскопії, розвитку моделей старіння електричної ізоляції під дією несприятливих експлуатаційних факторів, розвитку високовольтних методів випробувань а також застосуванні методів теорії цифрової обробки сигналів при побудові інформаційно-вимірювальних систем і аналізі часових рядів результатів вимірювань.

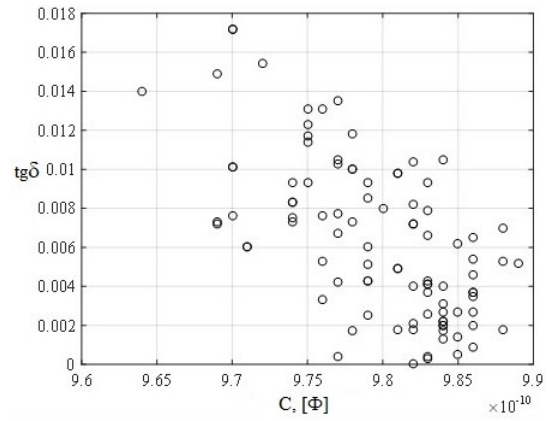
Встановлено, що особлива актуальність класичних методів контролю за значеннями електричної ємності та  $\text{tg}\delta$  зумовлена суттєвим зв'язком між зазначеними параметрами електричної ізоляції та діагностичними критеріями, отриманими із застосуванням інших, розповсюджених на практиці, методів контролю. В той же час, на основі аналізу наукових джерел, а також виходячи з досвіду практичних вимірювань зазначених параметрів, встановлено, що для багатьох розповсюджених на практиці об'єктів контролю вимірювання ємності та  $\text{tg}\delta$  суттєво ускладнені внаслідок суттєвого впливу паразитних ємнісних та індуктивних параметрів об'єктів контролю на результати вимірювання а також внаслідок недостатньої завадостійкості та інших недоліків існуючих алгоритмів обробки кривих струму та напруги і часових рядів результатів вимірювань. Вирішення зазначеної проблеми визначило обраний напрямок дисертаційного дослідження.

**Другий розділ** присвячено дослідженню специфічних особливостей часових рядів результатів вимірювання електричної ємності та  $\text{tg}\delta$  а також формуванню шляхів зменшення впливу розтікання спектру при їх спектральному аналізі. Зазначені специфічні особливості часових рядів сформульовані для екранованих та неекранованих кабелів на основі витої пари.

На рисунку 1 наведено діаграми  $C\text{-tg}\delta$ , побудовані на основі часових рядів результатів одночасного вимірювання ємності та  $\text{tg}\delta$  при контролі технічного стану ізоляції мережевих кабелів UTP та STP категорії 5e.



а



б

Рисунок 1 – Діаграми  $C$ - $\text{tg}\delta$ , побудовані для відповідних значень часових рядів результатів вимірювань електричної ємності та  $\text{tg}\delta$  при паралельній схемі заміщення об'єкту контролю:  $a$  – для кабелю UTP категорії 5е,  $b$  – для кабелю STP категорії 5е.

Порівняння наведених на рисунку 1а та рисунку 1б діаграм дозволяє зробити висновок щодо існування протилежного впливу флуктуацій результатів вимірювання електричної ємності на відповідні значення  $\text{tg}\delta$ . Так, для наведених на рисунку 1б результатів вимірювань, зменшення електричної ємності призводить до відповідного збільшення  $\text{tg}\delta$ , що повністю відповідає функціональній залежності між цими параметрами ізоляції для випадку паралельної схеми заміщення ємнісного об'єкту контролю. В той же час, для наведеної на рисунку 1а діаграми  $C$ - $\text{tg}\delta$  виділяються два діапазони значень електричної ємності, для яких її флуктуації мають протилежний вплив на виміряні значення  $\text{tg}\delta$ . Для діапазону значень  $C < 4.9$  нФ зменшення ємності призводить до одночасного збільшення  $\text{tg}\delta$  та співпадає із відповідною залежністю для наведеної на рисунку 1б діаграми. Одночасно з цим, для діапазону значень  $C > 4.9$  нФ збільшення електричної ємності призводить до збільшення виміряних значень  $\text{tg}\delta$ , що є характерним не для використаної при вимірюваннях паралельної а для послідовної схеми заміщення ємнісного об'єкту контролю. Незважаючи на те, що для твердих діелектриків із збільшеним значенням відносної діелектричної проникності внаслідок додаткових діелектричних втрат на поляризацію також характерні збільшені значення  $\text{tg}\delta$ , при одночасному контролі ємності та  $\text{tg}\delta$  зазначена особливість наведеної діаграми  $C$ - $\text{tg}\delta$  призводить до ускладнення фізичної інтерпретації отриманих результатів вимірювань. Зазначене ускладнення викликано суттєвою невідповідністю між розрахованим для всього часового ряду результатів вимірювань середнім арифметичним  $\text{tg}\delta$  та значенням  $\text{tg}\delta$ , що відповідає середньому арифметичному для часового ряду результатів вимірювання електричної ємності. Описану поведінку часових рядів результатів вимірювання електричної ємності та  $\text{tg}\delta$  а також їх відповідний дрейф та нестаціонарність при одночасному контролі цих параметрів, зазвичай, пов'язують з трибоелектричним ефектом або з процесами у використаному вимірювальному обладнанні. Для ідентифікації наявності періодичних складових в часових рядах результатів вимірювання ємності та  $\text{tg}\delta$ , що є ознакою виникнення на відповідній діаграмі  $C$ - $\text{tg}\delta$  аналогічних до наведених на рисунку 1а областей із



протилежним впливом флуктуацій електричної ємності на відповідні значення  $\text{tg}\delta$ , статистичний аналіз часових рядів  $C$  та  $\text{tg}\delta$  запропоновано доповнювати застосуванням методів спектрального аналізу на основі перетворення Фур'є. Враховуючи, що спектральний аналіз часових рядів результатів вимірювання  $\text{tg}\delta$  передбачає застосування перетворення Фур'є по відношенню до часового ряду, що містить суто нульові та додатні дискретні значення показано, що для таких часових рядів їх середнє арифметичне частотній області може призводити до втрати інформації щодо існування в них певної періодичної складової. Зазначена особливість часових рядів  $\text{tg}\delta$  проілюстрована для випадку часового ряду, представленого масивом значень  $\text{tg}\delta$ , який використовувався при побудові наведеної на рисунку 1а діаграми  $C - \text{tg}\delta$ .

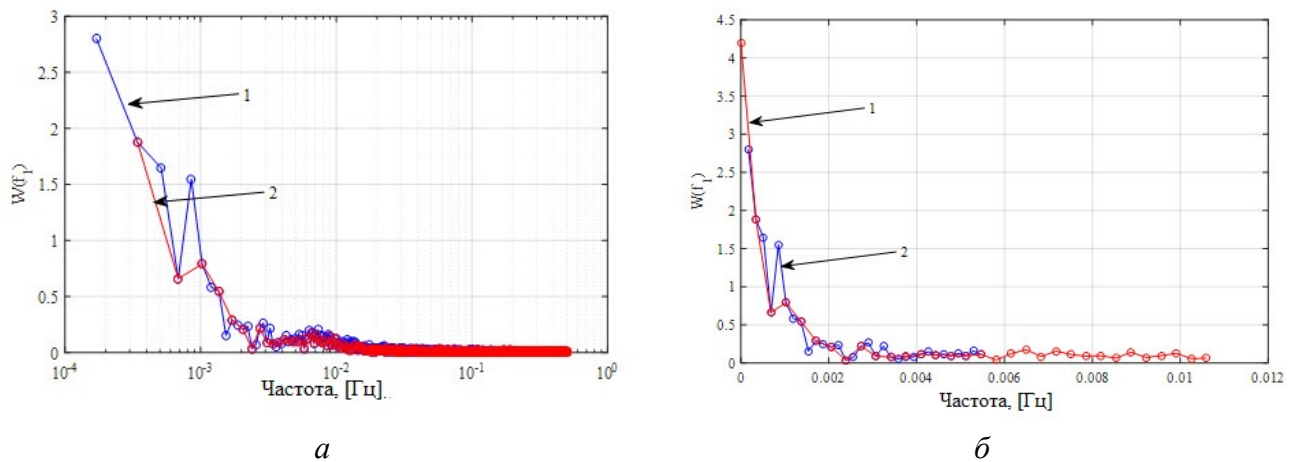


Рисунок 2 – Амплітудні спектри часового ряду  $\text{tg}\delta$ . для випадку, коли частоти гармонік визначені за формулою (21) (крива 1), та для випадку, коли ці частоти змінюються від 0 до частоти Найквіста (крива 2): *а* – в напівлогірифічному масштабі, *б* – в звичайному масштабі.

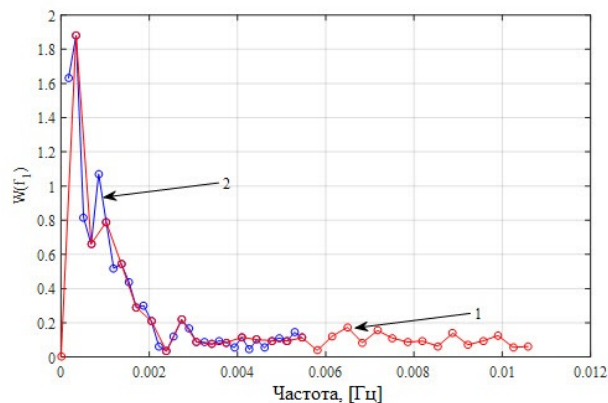


Рисунок 3 – Амплітудний спектр центрального часового ряду  $\text{tg}\delta$ . для випадку, коли частоти гармонік визначені за формулою (21) (крива 1), та для випадку, коли ці частоти змінюються від 0 до частоти Найквіста (крива 2).

Для наведених на рисунку 2 амплітудних спектрів будь-яке подальше зменшення частоти першої гармоніки не призводить до локалізації симетричного максимуму, що не дозволяє зробити висновок щодо частоти виявленого коливання. Враховуючи раніше зазначену особливість часових рядів результатів вимірювання  $\text{tg}\delta$ , згідно з якою при контролі цього параметру електричної ізо-

ляції результати вимірювання будуть представлені винятково додатними величинами, через що, за наявності періодичних коливань результатів вимірювань, взаємна компенсація їх від'ємних та додатних значень не буде відбуватись, зроблено припущення, що така поведінка амплітудних спектрів зумовлена саме впливом середнього арифметичного часового ряду. Враховуючи вказане припущення, проведені аналогічні розрахунки амплітудних спектрів для випадку центрованого часового ряду. Згідно із наведеними на рисунку 3 результатами, в цьому випадку вдалося усунути вказану причину спотворення амплітудних спектрів.

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. Зазначені обчислювальні процедури засновані на аналізі властивостей функції  $Q_i(\omega_r)$ , що розраховується для кожного з досліджуваних сигналів струму та напруги

$$Q_i = S(\omega_r) \cdot \zeta_i, \quad (1)$$

де  $S(\omega_r)$  – синус перетворення Фур'є досліджуваного сигналу,  $\zeta_i$  – залежний від дисперсії сигналу та частоти допоміжних синусоїдальних функцій параметр.

$$S(\omega_r) = \sum_{i=1}^5 s_i, \quad (2)$$

$$s_1 = \frac{A_2 \sin(\varphi_2) \omega_r}{(\omega_r - \omega_2)(\omega_r + \omega_2)}, \quad (3)$$

$$s_2 = -\frac{A_2 \omega_r \cos(b\omega_r) \sin(b\omega_2) \cos(\varphi_2)}{(\omega_r - \omega_2)(\omega_r + \omega_2)}, \quad (4)$$

$$s_3 = -\frac{A_2 \omega_r \cos(b\omega_r) \cos(b\omega_2) \sin(\varphi_2)}{(\omega_r - \omega_2)(\omega_r + \omega_2)}, \quad (5)$$

$$s_4 = \frac{A_2 \omega_2 \sin(b\omega_r) \cos(b\omega_2) \cos(\varphi_2)}{(\omega_r - \omega_2)(\omega_r + \omega_2)}, \quad (6)$$

$$s_5 = -\frac{A_2 \omega_2 \sin(b\omega_r) \sin(b\omega_2) \sin(\varphi_2)}{(\omega_r - \omega_2)(\omega_r + \omega_2)}, \quad (7)$$

де  $b$ ,  $\omega_2$ ,  $A_2$ ,  $\varphi_2$  – тривалість, кутова частота, амплітуда та початкова фаза досліджуваного сигналу,  $\omega_r$  – кутова частота допоміжних тригонометричних функцій з якими розраховується скалярний добуток досліджуваного сигналу,  $A_r$  амплітуда допоміжних тригонометричних функцій. Необхідний для розрахунку в ча-

стотній області значень  $Q_i$  множник  $\zeta_i$  розраховується у відповідності із виразом

$$\zeta_i = \frac{(\omega_r - \omega_2)(\omega_r + \omega_2)}{A_r A_2 \omega_r}. \quad (8)$$

Незважаючи на те, що формули (2-7) не забезпечують симетрію спектральної щільності сигналу відносно частоти Найквіста і, крім того, можуть бути використані лише за частот, що відповідають вимозі  $\omega_r \neq \omega_2$  їх застосування значно спрощує виділення внеску ортогональних тригонометричних складових в частотну залежність скалярного добутку (2). Для  $A_r = 1$  результат розрахунку добутку (1) виражається із використанням виразу

$$Q_i = \sin(\varphi_i) + D_{1i} + D_{2i} + D_{3i} + D_{4i}, \quad (9)$$

де всі коефіцієнти  $D_{1i}..D_{4i}$  визначаються за виразами:

$$D_{1i} = -\cos(b\omega_r) \sin(b\omega_2) \cos(\varphi_i), \quad (10)$$

$$D_{2i} = -\cos(b\omega_r) \cos(b\omega_2) \sin(\varphi_i), \quad (11)$$

$$D_{3i} = \frac{\omega_2 \sin(b\omega_r) \cos(b\omega_2) \cos(\varphi_i)}{\omega_r}, \quad (12)$$

$$D_{4i} = -\frac{\omega_2 \sin(b\omega_r) \sin(b\omega_2) \sin(\varphi_i)}{\omega_r}. \quad (13)$$

Розраховані в частотній області значення функції  $Q_i(f_r)$  представляють затухаючі коливання, проілюстровані навіченими на рисунку 4 результатами розрахунків, проведеними для сигналу за наявності, та за відсутності адитивного білого шуму.

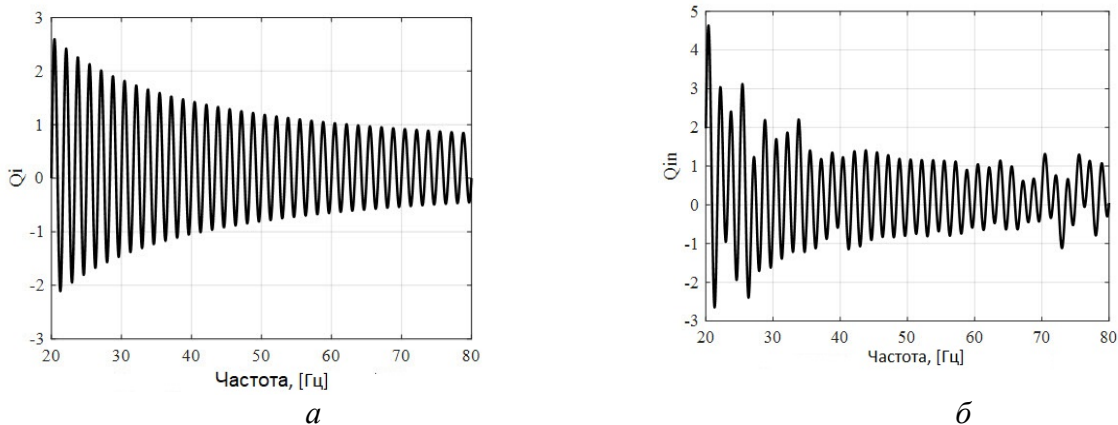


Рисунок 4 – Типові залежності функції  $Q_i$  в частотній області:

*a* – для сигналу з  $f_r = 50$  Гц,  $\varphi_i = 11.25^\circ$ ,  $b = 0.6$ ,  $A_1 = 10$  за відсутності адитивної компоненти білого шуму, *б* – сигналу з  $f = 50$  Гц,  $\varphi_i = 11.25^\circ$ ,  $b = 0.6$ ,  $A_1 = 10$  за відношення сигнал/шум, що складає 48.74.

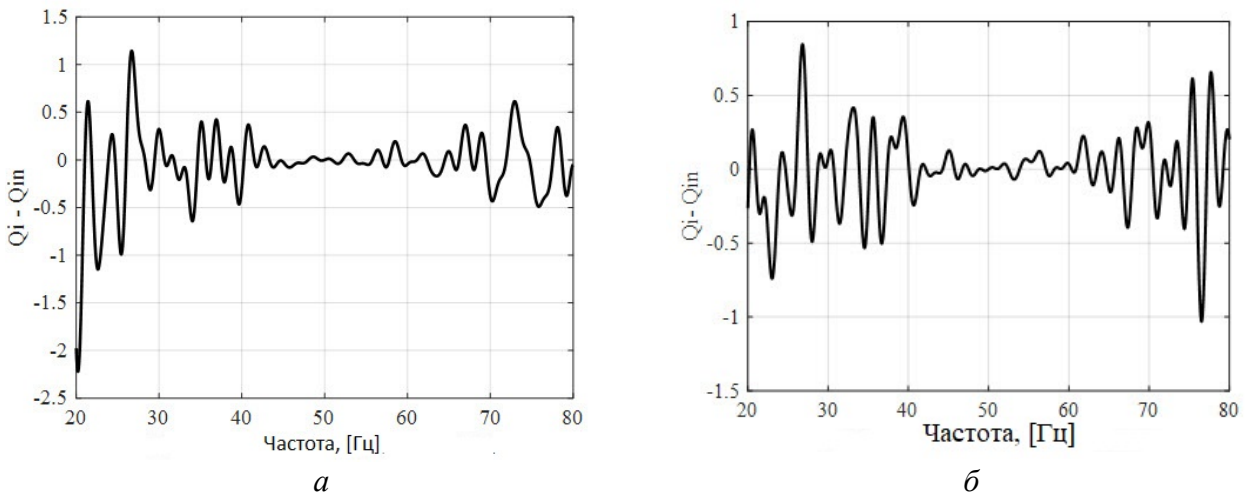


Рисунок 5 – Вплив адитивної компоненти білого шуму на розраховані значення функції  $Q_i$  в частотній області:

- $a$  – різниця між наведеними на Рис. 4а та Рис. 4б функціями,  
 $b$  – різниця між частотними залежностями  $Q_i$  розрахованими за наявності, та за відсутності адитивної компоненти білого шуму для сигналів із частотою  $f = 50$  Гц, відношенням сигнал/шум, що складає 48.55,  $\varphi_u = 33.75^\circ$ ,  $b = 0.6$ ,  $A_1 = 10$ .

Наведені на рисунку 4 та рисунку 5 результати розрахунків ілюструють зумовлене властивостями визначеного за формулою (8) множника  $\zeta_i$  збільшення впливу адитивного шуму на завадостійкість розрахунку функції  $Q_i(f_1)$  для віддалених від частоти досліджуваного сигналу частот  $\omega_r$ . В той же час для достатньо близьких до  $\omega_2$  значень  $\omega_r$  вплив адитивної компоненти шуму зменшується.

Невідоме значення початкових фаз кривих струму та напруги на досліджуваному об'єкті контролю розраховувалось за формулою

$$\varphi_i = \arcsin\left(\frac{Q_{i1} + Q_{i2} + Q_{i3} + \dots + Q_{iN}}{N}\right), \quad (14)$$

де  $N$  – загальна кількість використаних при розрахунку синус перетворення Фур'є допоміжних тригонометричних функцій.

В розділі проведено аналіз основних факторів, що зумовлюють систематичну похибку розрахунку початкової фази сигналів за формулою (14) та, відповідно, похибки контролю електричної ізоляції за параметром  $\text{tg}\delta$ . Показано, що до таких факторів, в першу чергу, належать:

- невідоме, для випадку присутності адитивної компоненти шуму, значення амплітуди досліджуваного сигналу, необхідне для розрахунку визначеного за формулою (8) множника  $\zeta_i$ ;

- різний внесок кожного з доданків  $Q_{i1}..Q_{iN}$  в розраховану частотну залежність функції  $Q_i(f_1)$  зумовлений тим, що зазначена частотна залежність має вигляд затухаючих коливань.

Враховуючи можливість визначення амплітуди гармонічних сигналів із параметрів утвореного відповідною залежністю між двома гармонічними сигналами

лами  $u_1(t)$  та  $u_2(t)$  еліпсу розсіювання, для вибору найбільш дієвих шляхів зменшення джерела систематичної похибки, викликаної невідомим значенням амплітуди досліджуваних сигналів в розділі проведено порівняльний аналіз заснованих на застосуванні методу найменших квадратів алгоритмів апроксимації еліпсу розсіювання. При застосуванні зазначеного підходу для оцінювання амплітуд гармонічних сигналів за наявності в них адитивної компоненти шуму їх значення розраховуються після визначення за методом найменших квадратів коефіцієнтів вектору  $\mathbf{a} = [A, B, C, D, E, F]$ , що містить невідомі параметри рівняння:

$$F(u_1, u_2) = Au_1^2 + Bu_1u_2 + Cu_2^2 + Du_1 + Eu_2 + F = 0. \quad (15)$$

Визначення невідомих коефіцієнтів рівняння (15) за методом найменших квадратів передбачає попереднє накладання певних обмежень на допустимі значення компонент вектору  $\mathbf{a}$ . При розрахунках використовувались алгоритми, що передбачають виконання умов:  $\|\mathbf{a}\| = 1$  і  $4AC - B^2 = 1$ . Крім того, коефіцієнти вектору  $\mathbf{a}$  оцінювались на основі прямого розрахунку, без залучення заснованих на застосуванні модифікацій методу найменших квадратів алгоритмів апроксимації еліпсу. Прямий розрахунок амплітуд проводився виходячи із припущення, що досліджувані сигнали з компонентою адитивного шуму коефіцієнт амплітуди мав таке саме значення як і для синусоїдального сигналу без складової шуму. Враховуючи зазначене припущення, для випадку прямого розрахунку амплітуд досліджуваних сигналів їх невідомі значення а також невідомі коефіцієнти  $A$  і  $C$  квадратичної форми еліпса розсіювання (15) оцінювались за формулами:

$$A = \frac{1}{2D_{1RMS}^2}, \quad (16)$$

$$C = \frac{1}{2D_{2RMS}^2}, \quad (17)$$

де  $D_{1RMS}$  і  $D_{2RMS}$  – середньоквадратичні значення досліджуваних сигналів. Враховуючи вирази (16, 17), для випадку прямого розрахунку коефіцієнтів квадратичної форми (15), невідомі значення амплітуд досліджуваних сигналів, що утворюють еліпс розсіювання, оцінювались за формулами:

$$D_1 = \frac{1}{\sqrt{A}}, \quad (18)$$

$$D_2 = \frac{1}{\sqrt{C}}. \quad (19)$$

Порівняльний аналіз точності оцінювання амплітуд проводився для алгоритмів, що передбачають пряме обчислення коефіцієнтів рівняння (15) за формулами (16-19) а також апроксимацію еліпса розсіювання шляхом використан-

ня модифікацій методу найменших квадратів з переліченими обмеженнями, накладеними на компоненти вектору  $\mathbf{a}$ . Розрахунки проводились для випадку двох різних за статистичними властивостями компонентів адитивного шуму  $\delta u_i$ . В першому випадку всі  $\delta u_i$  були представлені вибіркою, що містила некорельовані та нормально розподілені елементи. За таких статистичних властивостей  $\delta u_i$  виконувались умови найбільш ефективного застосування методу найменших квадратів. В цьому випадку всі елементи вибірки  $\delta u_i$  отримані шляхом генерування масивів білого шуму в програмному середовищі MATLAB. У другому випадку масиви  $\delta u_i$  отримані із довільно вибраного, попередньо оцифрованого та підсиленого сигналу шуму на вході та на виході фазового фільтру. Оскільки в такому випадку шумові складові сигналів обирались довільно, статистичні властивості цих масивів і, отже, всі елементи  $\delta u_i$  вибірки, що містила адитивні компоненти шуму, не відповідали критеріям найбільш ефективного застосування методу найменших квадратів. При розрахунках частота синусоїдальних сигналів встановлювалась рівною 100 Гц. Тривалість сигналів та відповідних компонентів шуму обиралась такою, що складала 0.01, 0.02, 0.03 та 0.04 с. Значення фазового зсуву між синусоїдальними сигналами встановлювалось рівним  $89.55^\circ$ , що відповідає досить високій добротності ємнісного об'єкта контролю.

На рисунку 6 наведено автокореляційні функції для використаних при розрахунках адитивних складових шуму, що відповідають випадку некорельованих і нормально розподілених значень  $\delta u_i$  а також випадку, коли елементи  $\delta u_i$  були отримані шляхом генерування масивів білого шуму.

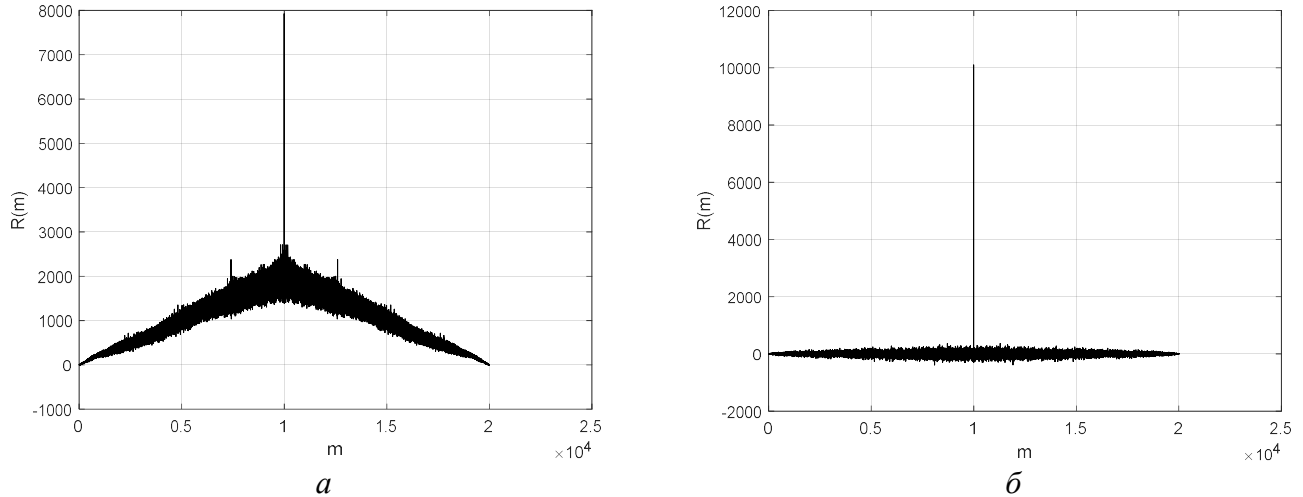


Рисунок 6 – Автокореляційні функції адитивних складових шуму в досліджуваних сигналах:  $a$  – для випадку, коли компонента шуму була представлена значеннями сигналу на виході фазового фільтру,  $b$  – для випадку, коли масив вибірки складової шуму, містив елементи, генеровані із використанням відповідних функцій MATLAB.

Приклад одного із еліпсів розсіювання, для якого визначались коефіцієнти рівняння (15) наведено на рисунку 7.

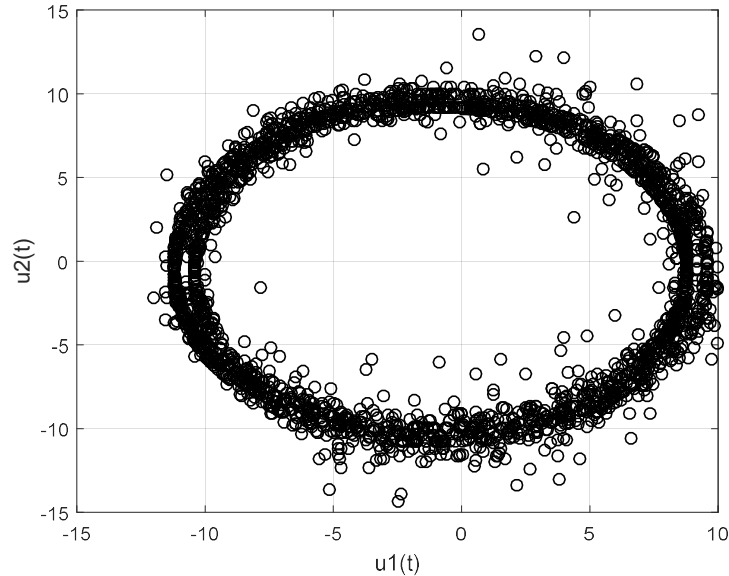


Рисунок 7 – Приклад одного із еліпсів розсіювання, для якого за методом найменших квадратів визначались коефіцієнти вектору  $\mathbf{a}$ .

Загальний рівень точності розглянутих підходів до оцінки параметрів вектору  $\mathbf{a}$  та амплітуд синусоїдальних сигналів оцінювався шляхом обчислення середньоквадратичної похибки результатів розрахунків амплітуд. Середньоквадратична похибка окремо розраховувалась для значень  $D_1$  та  $D_2$ , оцінених під впливом білого шуму та довільно вибраного сигналу на виході фазового фільтру. Для проведених розрахунків результати розрахунків амплітуд досліджуваних сигналів  $u_1(t)$  та  $u_2(t)$  об'єднувались в єдиний масив даних. Отже, обчислена середньоквадратична похибка в даному випадку одночасно є критерієм точності оцінювання двох амплітуд різних сигналів.

У випадку нормально розподіленого білого шуму обмеження на коефіцієнти квадратичної форми:  $\|\mathbf{a}\| = 1$  показало найнижчий рівень точності, оскільки середньоквадратична похибка складала:  $\sigma_{er} = 0.295$  В. Підходи до визначення коефіцієнтів вектору  $\mathbf{a}$ , засновані на застосуванні умови:  $4AC - B^2 = 1$  та на їх прямому обчисленні, показали приблизно однаковий рівень точності із  $\sigma_{er} = 0.107$  В та  $\sigma_{er} = 0.106$  В. Для випадку довільно вибраної та записаної осцилограми шумів фазового фільтру найменша точність також отримана для обмеження  $\|\mathbf{a}\| = 1$ , оскільки розраховане значення  $\sigma_{er}$  складало 0.158 В. Найвищий рівень точності також отриманий для випадку прямого обчислення коефіцієнтів вектору  $\mathbf{a}$  із  $\sigma_{er} = 0.035$  В. Результати, отримані для випадку застосування умови:  $4AC - B^2 = 1$ , показали рівень  $\sigma_{er} = 0.103$  В.

За результатами проведеного моделювання зроблено висновок, що підхід до визначення коефіцієнтів квадратичної форми еліпса розсіювання на основі їх прямого обчислення має істотні переваги у порівнянні із застосуванням методу найменших квадратів. Крім більш високого рівня точності, навіть незважаючи на майже рівні значення середньоквадратичної похибки, обчислені для випадку адитивної суміші синусоїдальних сигналів із нормально розподіленим білим шумом у випадку застосування умови:  $4AC - B^2 = 1$ , пряме обчислення коефіціє-

ентів рівняння (15) є значно простішим з точки зору розробки програмного забезпечення, оскільки такий підхід не потребує вирішення задачі методу найменших квадратів.

Враховуючи вказані обставини, встановлено, що визначення амплітуд досліджуваних гармонічних сигналів при застосуванні модифікованого кореляційного методу визначення фазового зсуву доцільно проводити без апроксимації еліпсу розсіювання шляхом застосування методу найменших квадратів, оскільки аналогічний рівень точності можна отримати шляхом прямого розрахунку коефіцієнтів рівняння (15).

Розрахунок скалярного добутку (2) можна проводити для будь-якого діапазону частот допоміжних тригонометричних функцій. В той же час, згідно з отриманими в розділі результатами показано, що зменшення систематичної похибки, викликані різним внеском кожного з доданків  $Q_{i1}..Q_{iN}$  в розраховану частотну залежність функції  $Q_i(f_1)$  досягається за рахунок розділення внеску визначених за формулами (10, 11) та (12, 13) ортогональних тригонометричних складових. Зазначене розділення можливе у випадку, коли частоти допоміжних синусоїдальних функцій, за якими розкладається досліджуваний сигнал при розрахунку його синус перетворення Фур'є, вибираються згідно із формулами:

$$f_{s1} = \frac{1}{4b} + \frac{k}{2b}, \quad (20)$$

$$f_{s2} = \frac{k}{2b}, \quad (21)$$

де  $f_{s1}$  частота використаної у виразі (2) допоміжної тригонометричної функції  $\sin(b\omega_r)$ , вибраної для спрощення цього виразу шляхом усунення складових  $s_2$  та  $s_3$ ,  $f_{s2}$  позначає частоту цієї ж функції, вибраної для спрощення виразу (2) шляхом усунення складових  $s_4$  та  $s_5$ ,  $k = 1..N$  і позначає порядковий номер допоміжної тригонометричної функції із загальної кількості допоміжних функцій  $N$ . З метою забезпечення однакового внеску кожного з доданків  $Q_{i1}..Q_{iN}$  в частотну залежність результатів розрахунку добутку (1) частоти допоміжних тригонометричних функцій  $\sin(b\omega_r)$  необхідно вибрати згідно із формулою (21).

Розрахований згідно з умовою (21) масив частот містить дві складові. Допоміжні тригонометричні функції, які використовуються для розкладання досліджуваного сигналу за допомогою дискретного перетворення Фур'є, без використання спектральних вікон, зазвичай мають свої частоти в діапазоні значень від 0 Гц до частоти Найквіста. Перша компонента розрахованої згідно з формулою (21) послідовності частот має в своєму складі такий самий масив значень (крім 0 Гц). Для випадку когерентної дискретизації досліджуваного сигналу ця складова містить точне значення його частоти а також частоти, в яких частотна характеристика перетворення Фур'є приймає нульові значення. Однак, оскільки згідно з формулою (21) порядковий номер гармоніки  $k$  ділиться на подвоєну тривалість досліджуваного сигналу, послідовність частот допоміжних тригонометричних функцій  $\sin(\omega_r t)$  також містить іншу складову. Для випадку когерент-



тної дискретизації частоти цієї складової масиву частот збігаються з максимумами бокових пелюсток частотної характеристики перетворення Фур'є та не містять точне значення частоти досліджуваного сигналу. З метою ілюстрації впливу усунення складових  $s_4$  та  $s_5$  синус перетворення Фур'є на розраховані в частотній області значення  $Q_{i1}..Q_{iN}$  на рисунку 8 наведено розраховані за формулою трапецій її типові частотні залежності у випадку вибору частот допоміжних тригонометричних функцій  $\sin(b\omega_r)$  за формулою (21)

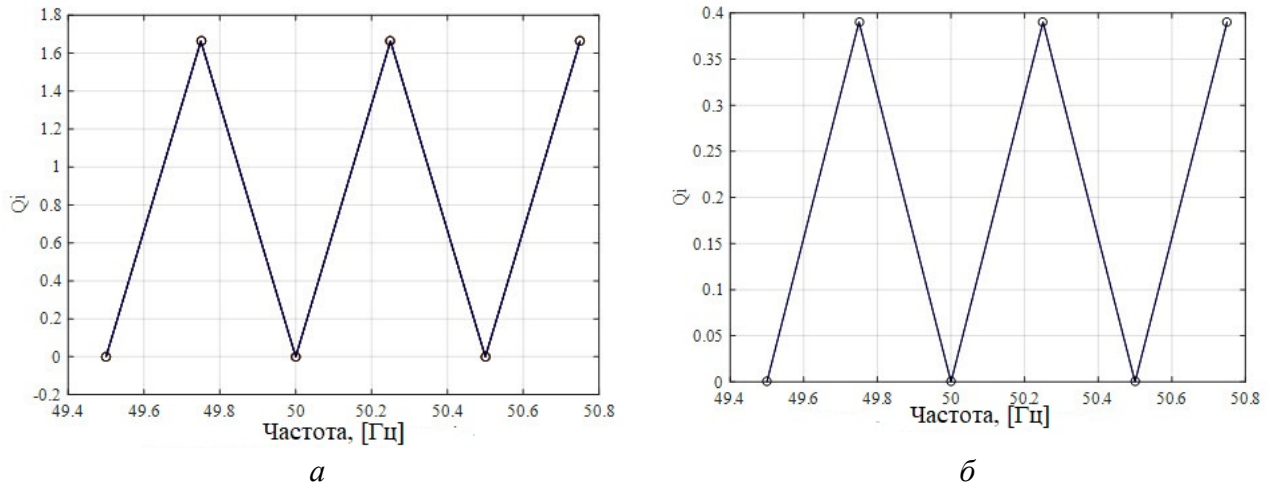


Рисунок 8 – Вплив вибору частот допоміжних тригонометричних функцій, за якими розкладаються досліджувані сигнали на частотну залежність розрахованих значень  $Q_i$ .

Порівняння наведених на рисунку 8 результатів розрахунків із проведеними для випадку довільно вибраних частот допоміжних тригонометричних функцій та наведеними на рисунку 4 розрахунками підтверджує можливість усунення затухаючих коливань розрахованих значень  $Q_{i1}..Q_{iN}$  за рахунок розкладання досліджуваних синусоїдальних сигналів із застосуванням тригонометричних функцій з частотами, визначеними за формулою (21).

Таким чином, розроблена модифікація кореляційного методу вимірювання фазового зсуву передбачає його оцінювання після попереднього розрахунку початкових фаз досліджуваних сигналів за формулою (14). Для такого розрахунку частоти допоміжних тригонометричних функцій, за якими розкладається досліджувані сигнали розраховуються за формулою (21) а невідомі, для випадку присутності адитивної складової шуму, амплітуди синусоїдальних сигналів та коефіцієнти квадратичної форми еліпса розсіювання оцінюються за виразами (16-19).

Результати порівняльного аналізу завадостійкості класичного кореляційного методу визначення фазового зсуву та його розробленої модифікації, наведено на рисунку 9.

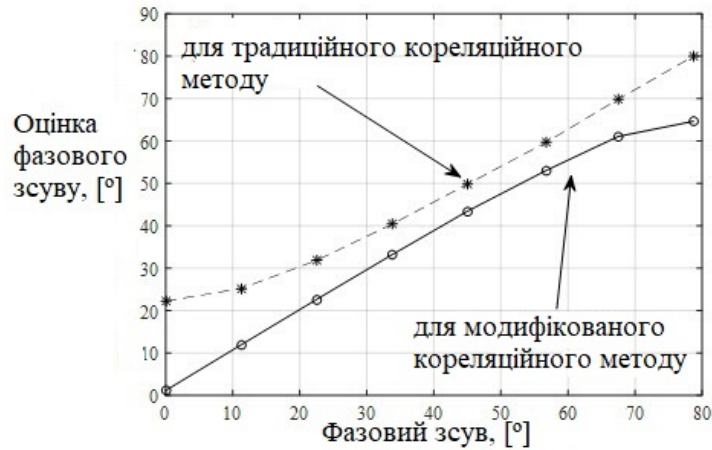


Рисунок 9 – Порівняльний аналіз завадостійкості класичного кореляційного методу та його розробленої модифікації для випадку, коли співвідношення сигнал/шум для досліджуваних сигналів складало 48.74 та 48.55.

Результати наведених на рисунку 9 розрахунків ілюструють збільшення завадостійкості визначення фазового зсуву для діапазону його значень від  $0^\circ$  до  $45^\circ$  і, крім того, практично лінійну залежність між його фактичними значеннями та проведеними за на основі застосування формул (1-14) оцінок. В той же час, в діапазоні значень фазового зсуву від  $45^\circ$  до  $90^\circ$  класичний кореляційний метод демонструє вищий рівень точності та кращу завадостійкість. Зменшення завадостійкості модифікованого кореляційного методу в діапазоні близьких до  $90^\circ$  значень фазового зсуву може бути викликано можливим порушенням взаємної компенсації похибок розрахунку значень  $Q_i$ , спричинених наявністю компонентів шуму в досліджуваних сигналах. Порушення такої взаємної компенсації ілюструють наведені на рисунку 10 результати розрахунків, що показують вплив адитивної нормально розподіленої складової білого шуму на розраховані в частотній області значення функції  $Q_i$ .

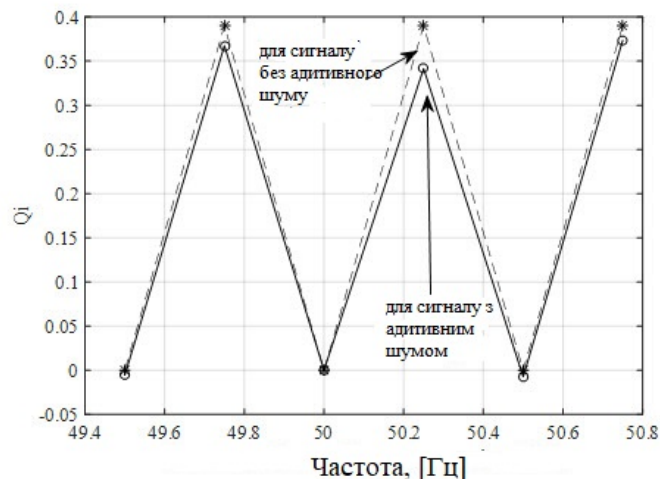


Рисунок 10 – Вплив компонентів шуму в досліджуваних сигналах на розраховані значення  $Q_i$  в частотній області.

Відповідно до наведених на рисунку 10 результатів розрахунків, для випадку сигналу без будь-яких компонентів шуму всі постійні ненульові значення  $Q_i$  залишаються вищими, ніж для випадку забрудненого адитивним шумом сиг-

налу. Зазначена обставина може призводити до зменшення завадостійкості розробленої модифікації кореляційного методу, оскільки перешкоджає взаємній компенсації похибок розрахунку значень  $Q_i$ . Таким чином, заснування розробленої модифікації кореляційного методу визначення фазового зсуву дозволяє збільшити завадостійкість визначення  $\text{tg}\delta$  об'єктів контролю із невисоким рівнем добротності.

В четвертому розділі проаналізовано особливості оцінювання параметрів часткових ємностей та відповідних їм значень  $\text{tg}\delta$  фазної та поясної ізоляції трьохжильних силових кабелів з паперовою імпрегнованою ізоляцією в спільній металевій оболонці шляхом використання методик, побудованих на використанні сукупних вимірювань. Контроль технічного стану ізоляції такого типу кабелів передбачає необхідність визначення кожного з індивідуальних значень ємності та  $\text{tg}\delta$  для наведеної на рисунку 11 загальноприйнятої схеми заміщення шарів ізоляції цих кабелів в режимі холостого ходу.

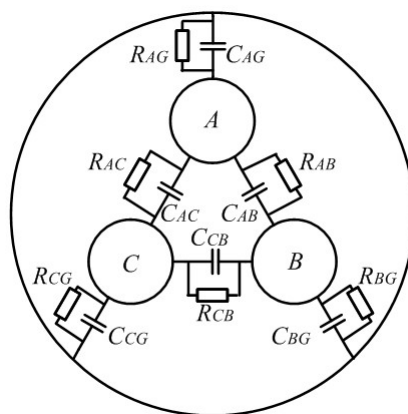


Рисунок 11 – Схема заміщення внутрішніх шарів ізоляції в трьохжильному силовому кабелі:  $C_{AB}$ ,  $C_{CB}$ ,  $C_{AC}$  – часткові ємності між жилами силового кабелю,  $C_{AG}$ ,  $C_{CG}$ ,  $C_{BG}$  – часткові ємності між оболонкою та відповідними жилами силового кабелю,  $R_{AB}$ ,  $R_{CB}$ ,  $R_{AC}$  – електричні опори внаслідок діелектричних втрат в шарах ізоляції між жилами силового кабелю,  $R_{AG}$ ,  $R_{BG}$ ,  $R_{CG}$  – електричні опори внаслідок діелектричних втрат в шарах ізоляції між жилами та оболонкою силового кабелю.

Обстеження ізоляції для кабелів із застосуванням сукупних вимірювань передбачає визначення її параметрів із застосуванням наступних схем з'єднання електропровідних елементів конструкції кабелю:

- «жила проти двох інших жил та оболонки». В цьому випадку випробувальна напруга послідовно прикладається до ізоляційного прошарку між кожною із жил силового кабелю та з'єднаними між собою та оболонкою двома іншими жилами. Застосування цієї схеми обстеження дозволяє визначити 3 сукупні значення електричної ємності ( $C_A$ ,  $C_B$ ,  $C_C$ ) та 3 відповідні сукупні значення  $\text{tg}\delta$  ( $\text{tg}\delta_A$ ,  $\text{tg}\delta_B$ ,  $\text{tg}\delta_C$ ). При застосуванні цієї схеми обстеження  $C_A$  та  $\text{tg}\delta_A$  позначають сукупне значення електричної ємності та тангенса кута діелектричних втрат, що виміряні при подачі випробувальної напруги до ізоляції між жилою  $A$  силового кабелю та з'єднаними між собою та металевою оболонкою жилами  $B$  і  $C$ .

- «дві жили проти жили та оболонки». В цьому випадку випробувальна напруга прикладається до ізоляційного прошарку між двома з'єднаними між со-

бою жилами силового кабелю та з'єднаною з оболонкою третьою жилою. Застосування цієї схеми обстеження дозволяє визначити 3 сукупні значення електричної ємності ( $C_{A-B}$ ,  $C_{B-C}$ ,  $C_{A-C}$ ) та 3 відповідні сукупні значення  $\text{tg}\delta$  ( $\text{tg}\delta_{A-B}$ ,  $\text{tg}\delta_{B-C}$ ,  $\text{tg}\delta_{A-C}$ ). При застосуванні цієї схеми обстеження  $C_{A-B}$  та  $\text{tg}\delta_{A-B}$  позначають сукупні значення електричної ємності та  $\text{tg}\delta$ , виміряні при подачі випробувальної напруги на шар ізоляції між з'єднаними між собою жилами  $A$  і  $B$  силового кабелю та з'єднаною з оболонкою жилою  $C$ .

- «три жили проти оболонки». При застосуванні цієї схеми обстеження випробувальна напруга прикладається між трьома з'єднаними між собою жилами силового кабелю та його оболонкою. Застосування цієї схеми обстеження дає можливість визначити 1 сукупне значення електричної ємності та 1 відповідне сукупне значення  $\text{tg}\delta$  ( $C_{ABC\_G}$ ,  $\text{tg}\delta_{ABC\_G}$ ).

За результатами проведених досліджень встановлена можливість існування кореляційних зв'язків між результатами вимірювання сукупних значень електричної ємності, що виміряні із застосуванням схем обстеження «жила проти двох інших жил та оболонки» та «дві жили проти жили та оболонки». Зазначені кореляційні зв'язки проілюстровані наведеними на рисунку 12 результатами вимірювань.

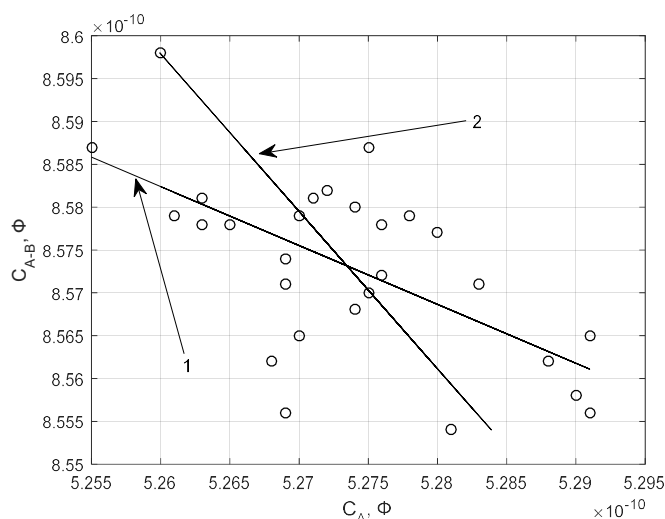


Рисунок 12 – Залежність між сукупними значеннями електричної ємності, виміряними при застосуванні схем обстеження ізоляції «жила проти двох інших жил та оболонки» та «дві жили проти жили та оболонки» та відповідні лінії регресії: 1 – лінія регресії  $C_{A-B}$  на  $C_A$ , 2 – лінія регресії  $C_A$  на  $C_{A-B}$ .

При визначенні індивідуальних параметрів кожного з шарів діелектрика для наведеної на рисунку 11 схеми заміщення силового кабелю із застосуванням сукупних вимірювань невідомі значення  $\text{tg}\delta$  визначають виходячи з результатів теорії фізики діелектриків, на основі співвідношень, що дозволяють розрахувати еквівалентний  $\text{tg}\delta$  для декількох паралельно з'єднаних конденсаторів на основі їх індивідуальних значень електричної ємності та  $\text{tg}\delta$ . Для випадку, коли обстеження передбачає проведення 3 вимірювань за схемою: «жила проти двох інших жил та оболонки» та 3 вимірювань за схемою «дві жили проти жили та оболонки» індивідуальні значення тангенса кута діелектричних втрат шарів

ізоляції між електропровідними елементами конструкції трьохжильних силових кабелів розраховуються шляхом вирішення системи алгебраїчних рівнянь:

$$\mathbf{T} \cdot \mathbf{d} = \mathbf{t}, \quad (22)$$

де  $\mathbf{t}$  – вектор, що містить результати вимірювань сукупних значень тангенса кута діелектричних втрат:  $\mathbf{t} = [\operatorname{tg}\delta_A, \operatorname{tg}\delta_B, \operatorname{tg}\delta_C, \operatorname{tg}\delta_{A-B}, \operatorname{tg}\delta_{B-C}, \operatorname{tg}\delta_{A-C}]^T$ ,  $\mathbf{d}$  – вектор, що містить невідомі значення тангенса кута діелектричних втрат ізоляційних прошарків між жилами силового кабелю та між його жилами та оболонкою:  $\mathbf{d} = [\operatorname{tg}\delta_{AB}, \operatorname{tg}\delta_{BC}, \operatorname{tg}\delta_{AC}, \operatorname{tg}\delta_{AG}, \operatorname{tg}\delta_{BG}, \operatorname{tg}\delta_{CG}]^T$ , а елементи матриці  $\mathbf{T}$  мають вигляд:

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} a_1 & 0 & a_2 & a_3 & 0 & 0 \\ a_4 & a_5 & 0 & 0 & a_6 & 0 \\ 0 & a_7 & a_8 & 0 & 0 & a_9 \\ 0 & a_{10} & a_{11} & a_{12} & a_{13} & 0 \\ a_{14} & 0 & a_{15} & 0 & a_{16} & a_{17} \\ a_{18} & a_{19} & 0 & a_{20} & 0 & a_{21} \end{pmatrix}, \quad (23)$$

де всі коефіцієнти  $a_1..a_{21}$  визначаються на основі попередньо розрахованих значень часткових ємностей між жилами силового кабелю та між його жилами та оболонкою  $i$ , в свою чергу, визначаються згідно із виразами:

$$\mathbf{a}_{1-3} = \frac{1}{C_{AB} + C_{AC} + C_{AG}} \cdot \mathbf{C}_{1-3}, \quad (24)$$

$$\mathbf{a}_{4-6} = \frac{1}{C_{AB} + C_{BC} + C_{BG}} \cdot \mathbf{C}_{4-6}, \quad (25)$$

$$\mathbf{a}_{7-9} = \frac{1}{C_{BC} + C_{AC} + C_{CG}} \cdot \mathbf{C}_{7-9}, \quad (26)$$

$$\mathbf{a}_{10-13} = \frac{1}{C_{BC} + C_{AC} + C_{AG} + C_{BG}} \cdot \mathbf{C}_{10-13}, \quad (27)$$

$$\mathbf{a}_{14-17} = \frac{1}{C_{AB} + C_{AC} + C_{BG} + C_{CG}} \cdot \mathbf{C}_{14-17}, \quad (28)$$

$$\mathbf{a}_{18-21} = \frac{1}{C_{AB} + C_{BC} + C_{AG} + C_{CG}} \cdot \mathbf{C}_{18-21}, \quad (29)$$

де компоненти векторів  $\mathbf{a}_{1-3}.. \mathbf{a}_{18-21}$  визначаються у відповідності із виразами:  $\mathbf{a}_{1-3} = [a_1 \ a_2 \ a_3]$ ,  $\mathbf{a}_{4-6} = [a_4 \ a_5 \ a_6]$ ,  $\mathbf{a}_{7-9} = [a_7 \ a_8 \ a_9]$ ,  $\mathbf{a}_{10-13} = [a_{10} \ a_{11} \ a_{12} \ a_{13}]$ ,  $\mathbf{a}_{14-17} = [a_{14} \ a_{15} \ a_{16} \ a_{17}]$ ,  $\mathbf{a}_{18-21} = [a_{18} \ a_{19} \ a_{20} \ a_{21}]$ , а компоненти векторів  $\mathbf{C}_{1-3}.. \mathbf{C}_{18-21}$  визначаються у відповідності із виразами:  $\mathbf{C}_{1-3} = [C_{AB} \ C_{AC} \ C_{AG}]$ ,  $\mathbf{C}_{4-6} = [C_{AB} \ C_{BC} \ C_{BG}]$ ,  $\mathbf{C}_{7-9} = [C_{BC} \ C_{AC} \ C_{CG}]$ ,  $\mathbf{C}_{10-13} = [C_{BC} \ C_{AC} \ C_{AG} \ C_{BG}]$ ,  $\mathbf{C}_{14-17} = [C_{AB} \ C_{AC} \ C_{BG} \ C_{CG}]$ ,  $\mathbf{C}_{18-21} = [C_{AB} \ C_{BC} \ C_{AG} \ C_{CG}]$ .

Аналітичне вирішення системи (22), має вигляд:

$$\mathbf{d} = \mathbf{T}^{-1}\mathbf{t}, \quad (30)$$

де  $\det(\mathbf{T}) \neq 0$  а елементи матриці  $\mathbf{T}^{-1}$  визначаються згідно із формулою:

$$\mathbf{T}^{-1} = 0.5 \cdot \begin{pmatrix} \frac{1}{a_1} & \frac{1}{a_4} & 0 & -k_1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{a_5} & \frac{1}{a_7} & 0 & -k_2 & 0 \\ \frac{1}{a_2} & 0 & \frac{1}{a_8} & 0 & 0 & -k_3 \\ 0 & -k_4 & -k_5 & \frac{1}{a_{12}} & 0 & \frac{1}{a_{20}} \\ -k_6 & 0 & -k_7 & \frac{1}{a_{13}} & \frac{1}{a_{16}} & 0 \\ -k_8 & -k_9 & 0 & 0 & \frac{1}{a_{17}} & \frac{1}{a_{21}} \end{pmatrix}, \quad (31)$$

де коефіцієнти  $k_1..k_9$  розраховуються із використанням наведених в таблиці 1 виразів.

Таблиця 1 – Вирази для розрахунку елементів  $k_1..k_9$  матриці  $\mathbf{T}^{-1}$

Коефіцієнт	Формула для розрахунку	Коефіцієнт	Формула для розрахунку
$k_1$	$\frac{C_{BC} + C_{AC} + C_{AG} + C_{BG}}{C_{AB}}$	$k_6$	$\frac{C_{AB} + C_{AC} + C_{AG}}{C_{BG}}$
$k_2$	$\frac{C_{AB} + C_{AC} + C_{BG} + C_{CG}}{C_{BC}}$	$k_7$	$\frac{C_{BC} + C_{AC} + C_{CG}}{C_{BG}}$
$k_3$	$\frac{C_{AB} + C_{BC} + C_{AG} + C_{CG}}{C_{AC}}$	$k_8$	$\frac{C_{AB} + C_{AC} + C_{AG}}{C_{CG}}$
$k_4$	$\frac{C_{AB} + C_{BC} + C_{BG}}{C_{AG}}$	$k_9$	$\frac{C_{AB} + C_{BC} + C_{BG}}{C_{CG}}$
$k_5$	$\frac{C_{BC} + C_{AC} + C_{CG}}{C_{AG}}$		

Враховуючи формулу (30), в явному вигляді вирази для значень тангенса кута діелектричних втрат шарів ізоляції трьохжильного силового кабелю записуються згідно із формулами:

$$\operatorname{tg}\delta_{AB} = 0.5 \cdot \left( \frac{\operatorname{tg}\delta_A}{a_1} + \frac{\operatorname{tg}\delta_B}{a_4} - k_1 \operatorname{tg}\delta_{A-B} \right), \quad (32)$$

$$\operatorname{tg}\delta_{BC} = 0.5 \cdot \left( \frac{\operatorname{tg}\delta_B}{a_5} + \frac{\operatorname{tg}\delta_C}{a_7} - k_2 \operatorname{tg}\delta_{B-C} \right), \quad (33)$$

$$\operatorname{tg}\delta_{AC} = 0.5 \cdot \left( \frac{\operatorname{tg}\delta_A}{a_2} + \frac{\operatorname{tg}\delta_C}{a_8} - k_3 \operatorname{tg}\delta_{A-C} \right), \quad (34)$$

$$\operatorname{tg}\delta_{AG} = 0.5 \cdot \left( \frac{\operatorname{tg}\delta_{A-B}}{a_{12}} + \frac{\operatorname{tg}\delta_{A-C}}{a_{20}} - k_4 \operatorname{tg}\delta_B - k_5 \operatorname{tg}\delta_C \right), \quad (35)$$

$$\operatorname{tg}\delta_{BG} = 0.5 \cdot \left( \frac{\operatorname{tg}\delta_{A-B}}{a_{13}} + \frac{\operatorname{tg}\delta_{B-C}}{a_{16}} - k_6 \operatorname{tg}\delta_A - k_7 \operatorname{tg}\delta_C \right), \quad (36)$$

$$\operatorname{tg}\delta_{CG} = 0.5 \cdot \left( \frac{\operatorname{tg}\delta_{B-C}}{a_{17}} + \frac{\operatorname{tg}\delta_{A-C}}{a_{21}} - k_8 \operatorname{tg}\delta_A - k_9 \operatorname{tg}\delta_B \right), \quad (37)$$

Результати застосування аналітичного вирішення системи рівнянь для випадку обстеження силового кабелю ААШв 6-3×150 наведено на рисунку 13.

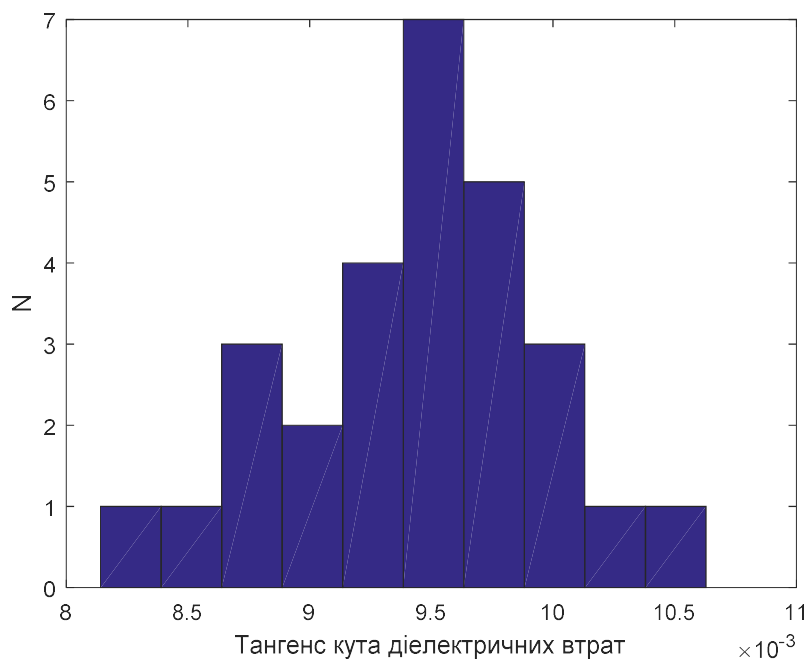


Рисунок 13 – Гістограма розподілу значень тангенса кута діелектричних втрат шару ізоляції між жилами *A* і *B* силового кабелю.

В п'ятому розділі, розроблено модифіковані схеми з'єднання електропровідних елементів конструкції трьохжильних силових кабелів в спільній металевій оболонці при визначенні індивідуальних параметрів шарів їх фазної ізоляції. Розроблена схема з'єднання електропровідних елементів наведено на рисунку 14.

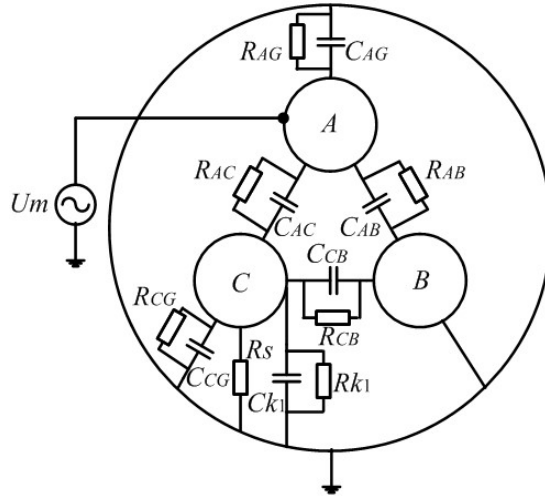


Рисунок 14 – Модифікована схема з'єднання електропровідних елементів при обстеженні фазної ізоляції трьохжильного силового кабелю:  $C_k$  – електрична ємність допоміжного конденсатора,  $R_k$  – електричний опір, викликаний діелектричними втратами в допоміжному конденсаторі,  $R_s$  – допоміжний змінний резистор.

Представлена на рисунку 14 схема заснована на схемі обстеження «жила проти двох інших жил та оболонки». Однак, на відміну від зазначеної схеми у розглянутому випадку досліджуваний шар ізоляції заземлений через резистор з достатньо низьким значенням електричного опору. Крім того, на відміну від цієї схеми розглянутий випадок не передбачає з'єднання жил  $C$  та  $B$ , які, відповідно, в цьому випадку будуть мати різний електричний потенціал. Такий спосіб з'єднання зумовлює деяке падіння напруги між жилою  $C$  і заземленою оболонкою кабелю. Існування цього додаткового падіння напруги вимагає врахування наявності двох додаткових шарів ізоляції з їх електричною ємністю та зумовленим діелектричними втратами опором.

Розроблений метод обстеження фазної ізоляції для наведеної на рисунку 14 схеми з'єднання електропровідних елементів обґрунтовано на прикладі визначення електричної ємності та відповідного значення  $\text{tg}\delta$  ізоляції між жилами  $A$  і  $C$  силового кабелю та заснований на застосуванні властивостей напруги на досліджуваному шарі ізоляції та між жилою  $C$  та заземленою оболонкою кабелю. Згідно з цією схемою обстеження визначено, що частини еквівалентної схеми, які містять параметри досліджуваного шару ізоляції ( $R_{AC}$  і  $C_{AC}$ ), з'єднані паралельно щодо гілок з паразитними параметрами ( $R_{AG}$ ,  $C_{AG}$ ,  $R_{AB}$ ,  $C_{AB}$ ), тоді як гілки з паразитними параметрами  $R_{CG}$ ,  $C_{CG}$ ,  $R_{CB}$ ,  $C_{CB}$  з'єднані послідовно з параметрами досліджуваного шару ізоляції. У цьому випадку значення падіння напруги на досліджуваному шарі ізоляції між жилами  $A$  і  $C$  ( $U_{11}$ ) і між жилою  $C$  і заземленою оболонкою кабелю ( $U_{21}$ ) а також їх фази виражаються за формулами:

$$U_{11} = \frac{UR_{AC}(j\omega C_{1k}R_{1k}R_s + R_s + R_{1k})}{R_{AC}R_s + R_{AC}R_{1k} + R_sR_{1k} + jA_1 + jA_2}, \quad (38)$$

$$U_{21} = \frac{UR_1R_s(j\omega C_{AC}R_{AC} + 1)}{R_{AC}R_s + R_{AC}R_1 + R_sR_1 + jA_1 + jA_2}, \quad (39)$$



$$\varphi_{U1} = \operatorname{arctg} \left( \frac{\sum_{i=1}^3 g_i}{\sum_{i=4}^{10} g_i} \right), \quad (40)$$

$$\varphi_{U2} = \operatorname{arctg} \left( -\frac{\sum_{i=11}^{13} g_i}{\sum_{i=14}^{18} g_i} \right), \quad (41)$$

де  $\omega$  – кутова частота,  $U$  – діюче значення прикладеної до кабелю напруги а параметри  $A_1, A_2, C_{1k}$  та  $R_{1k}$  визначаються за формулами:

$$A_1 = \omega R_{AC} C_{1k} R_{1k} R_s, \quad (42)$$

$$A_2 = \omega R_s R_{1k} C_{AC} R_{AC}, \quad (43)$$

$$C_{1k} = C_1 + C_{k1}, \quad (44)$$

$$R_{1k} = \frac{R_{CG} R_{CB} R_{k1}}{R_{CB} R_{k1} + R_{CG} R_{k1} + R_{CB} R_{CG}}, \quad (45)$$

параметр  $C_1$  розраховується за виразом

$$C_1 = C_{CG} + C_{BC}. \quad (46)$$

Формули для розрахунку використаних при запису формул (40, 41) параметрів  $g_1 \dots g_{18}$  наведені в таблиці 2.

Таблиця 2 – Вирази для розрахунку коефіцієнтів  $g_1 \dots g_{18}$

Коефіцієнт	Формула для розрахунку	Коефіцієнт	Формула для розрахунку
$g_1$	$\omega C_{1k} R_s^2 R_{1k}^2$	$g_{10}$	$\omega^2 C_{1k} R_{1k}^2 R_s^2 R_{AC} C_{AC}$
$g_2$	$-\omega R_{1k} R_s^2 C_{AC} R_{AC}$	$g_{11}$	$\omega R_{AC} C_{1k} R_{1k} R_s$
$g_3$	$-\omega R_{1k} R_s^2 C_{AC} R_{AC}$	$g_{12}$	$-R_s \omega C_{AC} R_{AC}^2$
$g_4$	$R_{AC} R_s^2$	$g_{13}$	$-\omega R_{AC}^2 C_{AC} R_{1k}$
$g_5$	$2R_s R_{1k} R_{AC}$	$g_{14}$	$R_{AC} R_s$
$g_6$	$R_{1k} R_s^2$	$g_{15}$	$R_{AC} R_{1k}$
$g_7$	$R_{AC} R_{1k}^2$	$g_{16}$	$R_{1k} R_s$
$g_8$	$R_{1k}^2 R_s$	$g_{17}$	$R_s R_{1k} \omega^2 C_{AC} R_{AC}^2 C_{1k}$
$g_9$	$\omega^2 C_{1k}^2 R_{1k}^2 R_s^2 R_{AC}$	$g_{18}$	$R_s \omega^2 C_{AC}^2 R_{AC}^2 R_{1k}$

Показано, що для наведеної на рисунку 14 схеми обстеження фазної ізоляції, у випадку відсутності допоміжного конденсатору  $C_K$ , а також за значення опору

допоміжного резистору, що відповідає вимозі:  $R_s \rightarrow 0$  величина фазового зсуву між кривими напруги на досліджуваному шарі ізоляції та між жилою  $C$  та заземленою оболонкою кабелю співпадає із значенням фазового зсуву між струмом та напругою для випадку паралельної схеми заміщення ємнісного об'єкта контролю з діелектричними втратами. Зазначена особливість дозволяє визначати  $\text{tg}\delta$  фазної ізоляції шляхом вимірювання фазового зсуву  $\varphi_{U1U2}$  між кривими напруги на досліджуваному шарі ізоляції між жилами  $A$  і  $C$  і між жилою  $C$  і заземленою оболонкою кабелю за достатньо малого значення опору резистору  $R_s$ . Недоліком такого підходу є можливість виникнення систематичної похибки вимірювань, через неможливість виконання вимоги:  $R_s \rightarrow 0$  внаслідок необхідності підтримувати величину опору за значень, достатніх для вимірювання падіння напруги на цьому резисторі. Суттєвим недоліком також є безперечне погіршення завадостійкості вимірювань фазового зсуву внаслідок необхідності вимірювання відносно невеликих значень падіння напруги на резисторі  $R_s$ . Зазначене погіршення завадостійкості проілюстровано наведенними на рисунку 15 результатами вимірювання напруг при визначенні фази  $\varphi_{U1}$ .

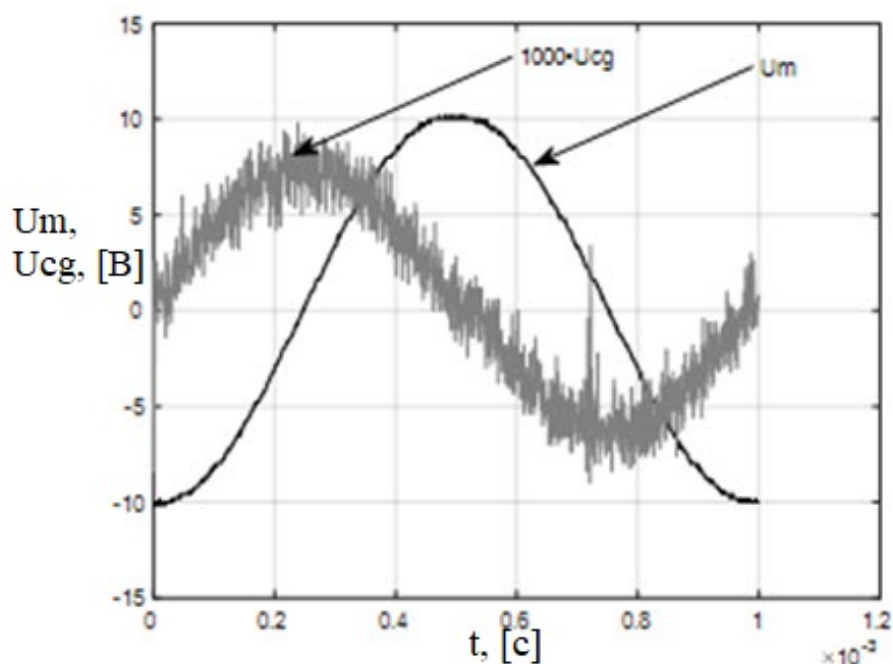


Рисунок 15 – Типові осцилограмами кривих напруги при визначенні тангенса кута діелектричних втрат за описаною методикою ( $U_m$  – крива тестової напруги, прикладеної до силового кабелю,  $U_{cg}$  – напруги між жилою  $C$  та заземленою оболонкою).

Усунення зазначених недоліків визначення  $\text{tg}\delta$  фазної ізоляції досягається шляхом використання визначених за формулами (38, 39) напруг на досліджуваному шарі ізоляції між жилами силового кабелю та між однією з його жил та заземленою оболонкою. Так, для випадку  $\varphi_{U1} = 0$ , шляхом розв'язання відповідного рівняння відносно опору  $R_s$ , встановлено, що зазначена рівність:  $\varphi_{U1} = 0$  забезпечується як у випадку  $R_s = 0$ , так і у випадку, коли значення  $R_s$  відповідає умові

$$R_{s1} = \frac{R_{1k} C_{AC} R_{AC}}{C_{1k} R_{1k} - C_{AC} R_{AC}} = \frac{C_{AC} R_{AC}}{C_{1k} - G_{1k} C_{AC} R_{AC}}, \quad (47)$$

де параметр  $G_{1k}$  визначається за формулою

$$G_{1k} = R_{1k}^{-1} = G_{k1} + G_1 = \frac{1}{R_{k1}} + \frac{R_{CB} + R_{CG}}{R_{CB} R_{CG}}. \quad (48)$$

Шляхом підстановки виразу (47) в формулу (41), встановлено, що виконання умови (47) забезпечує одночасно не лише рівність:  $\varphi_{U1} = 0$ , але й рівність:  $\varphi_{U2} = 0$ . Крім того, після підстановки виразу (47) в формулу (38), зроблено висновок, що у випадку  $\varphi_{U1} = \varphi_{U2} = 0$  значення падіння напруги на шарі ізоляції між жилами  $A$  і  $C$  визначається за виразом

$$U_{11RS} = \frac{UC_{1k}}{C_{1k} + C_{AC}}, \quad (49)$$

де  $U_{11RS}$  – значення напруги на шарі ізоляції між жилами  $A$  і  $C$ , визначене у випадку, коли значення  $R_s$  задовольняє умові (47). Після підстановки виразу (47) в формулу (39), встановлено, що для випадку  $\varphi_{U1} = \varphi_{U2} = 0$  значення  $U_{21}$  визначається за формулою

$$U_{21RS} = \frac{UC_{AC}}{C_{1k} + C_{AC}}, \quad (50)$$

де  $U_{21RS}$  – значення напруги  $U_{21}$  у випадку, коли значення  $R_s$  задовольняє умові (47). Згідно з виразами (49, 50) зроблено висновок, що у випадку, якщо  $R_s$  задовольняє умові (47), значення падіння напруги на досліджуваному шарі ізоляції між жилами  $A$  і  $C$  не залежить від зумовлених діелектричними втратами елементів ( $R_{AC}, R_1$ ) схеми обстеження на рисунку 14. Виконання цієї умови також дозволяє забезпечити незалежність  $U_{11RS}$  та  $U_{21RS}$  від величини допоміжного резистора  $R_s$ . Отже, шляхом розрахунку відношення виразів (49) і (50), показано, що значення цього відношення визначається лише відношенням часткових ємностей  $C_1$  і  $C_{AC}$

$$\frac{U_{11RS}}{U_{21RS}} = \frac{C_{1k}}{C_{AC}} = \frac{C_1 + C_{k1}}{C_{AC}}. \quad (51)$$

Якщо замінити конденсатор  $C_{k1}$  іншим конденсатором з параметрами  $C_{k2}, R_{k2}$ , то раніше визначена умова (47) буде досягатись за іншого значення допоміжного опору  $R_s$ . Отже, умова (47) буде сформульована згідно із виразом

$$R_{s2} = \frac{R_{2k} C_{AC} R_{AC}}{C_{2k} R_{2k} - C_{AC} R_{AC}} = \frac{C_{AC} R_{AC}}{C_{2k} - G_{2k} C_{AC} R_{AC}}, \quad (52)$$

де  $R_{s2}$  – значення допоміжного опору  $R_s$ , яке дозволяє забезпечити рівність:  $\varphi_{U1} = \varphi_{U2} = 0$  і визначається у випадку, якщо конденсатор  $C_{k1}$  замінити іншим еталонним конденсатором з параметрами  $C_{k2}$ ,  $R_{k2}$ . Значення  $C_{2k}$  і  $G_{2k}$  виражаються за формулами:

$$C_{2k} = C_1 + C_{k2}, \quad (53)$$

$$G_{2k} = R_{2k}^{-1} = G_{k2} + G_1 = \frac{1}{R_{k2}} + \frac{R_{CB} + R_{CG}}{R_{CB}R_{CG}}. \quad (54)$$

Зміна ємності опорного конденсатору від значення  $C_{k1}$  до значення  $C_{k2}$  також призводить до зміни падіння напруги на досліджуваному шарі ізоляції та на резисторі  $R_{s2}$ . Ці значення напруг виражаються за формулами:

$$U_{12RS} = \frac{UC_{2k}}{C_{2k} + C_{AC}}, \quad (55)$$

$$U_{22RS} = \frac{UC_{AC}}{C_{2k} + C_{AC}}, \quad (56)$$

де  $U_{12RS}$  – значення падіння напруги між жилами  $A$  і  $C$  за умови відповідності  $R_s$  визначеною за формулою (52) вимозі,  $U_{22RS}$  – значення падіння напруги на резисторі  $R_s$  за умови відповідності його опору формулі (52).

Після визначення відношення виразів (55) та (56) отримано вираз, подібний до формули (51), але сформульований після заміни опорного конденсатору з ємністю  $C_{k1}$  конденсатором з ємністю  $C_{k2}$

$$\frac{U_{12RS}}{U_{22RS}} = \frac{C_{2k}}{C_{AC}} = \frac{C_1 + C_{k2}}{C_{AC}}. \quad (57)$$

Розв'язання виразу (51) відносно ємності  $C_{AC}$  дає можливість отримати формулу

$$C_{AC} = \frac{U_{21RS}(C_{k1} + C_1)}{U_{11RS}}. \quad (58)$$

Після підстановки отриманого для ємності  $C_{AC}$  виразу в формулу (57) отримано формулу для розрахунку невідомої ємності  $C_1$

$$C_1 = \frac{U_{12RS}U_{21RS}C_{k1} - U_{11RS}U_{22RS}C_{k2}}{U_{11RS}U_{22RS} - U_{12RS}U_{21RS}}. \quad (59)$$

Розрахунок  $C_1$  за допомогою (59) дозволяє визначити невідоме значення часткової ємності  $C_{AC}$  згідно із виразом (58). Визначання цих ємнісних параметрів для наведеної на рисунку 14 схеми з'єднання електропровідних елементів

силового кабелю дає можливість розрахунку, визначених діелектричними втратами елементів схеми. Розв'язок виразу (47) відносно невідомого значення опору  $R_{AC}$  записується у вигляді

$$R_{AC} = \frac{C_{1k} R_{s1}}{C_{AC} (G_1 R_{s1} + G_{k1} R_{s1} + 1)}. \quad (60)$$

Після підстановки виразу (60) в формулу (52) невідомий параметр  $G_1$  може бути розрахований шляхом використання виразу

$$G_1 = -\frac{C_{1k} G_{k2} R_{s1} R_{s2} - C_{2k} G_{k1} R_{s1} R_{s2} + C_{1k} R_{s1} - C_{2k} R_{s2}}{R_{s1} R_{s2} (C_{1k} - C_{2k})}. \quad (61)$$

Таким чином, розроблена методика вимірювання електричної ємності та  $\text{tg}\delta$  шарів фазної ізоляції трьохжильних силових кабелів із паперовою імпрегнованою ізоляцією в спільній металевій оболонці передбачає виконання наступних процедур:

- заземлення досліджуваного шару ізоляції через деякий змінний резистор  $R_s$  і включений паралельно по відношенню до цього резистору конденсатор  $C_{k1}$  за схемою, представленою на рисунку 14;
- регулювання  $R_s$  до моменту, коли величина фазового зсуву між осцилограмами падіння напруги на досліджуваному шарі ізоляції ( $U_{11}$ ) і резисторі заземлення  $R_s$  ( $U_{21}$ ) буде дорівнювати нулю;
- вимірювання напруг  $U_{11}$ ,  $U_{21}$  та опору  $R_{s1}$ ;
- заміна допоміжного еталонного конденсатора іншим конденсатором із задалегідь визначеними параметрами  $C_{k2}$  і  $R_{k2}$ ;
- регулювання  $R_s$  до моменту, коли величина фазового зсуву між осцилограмами падіння напруги на досліджуваному шарі ізоляції ( $U_{12}$ ) і резисторі  $R_s$  ( $U_{22}$ ) буде дорівнювати нулю;
- вимірювання напруг  $U_{12}$  і  $U_{22}$  та опору заземлення  $R_{s2}$ ;
- розрахунок  $C_1$  згідно із формулою (40);
- розрахунок  $C_{AC}$  із використанням виразу (39);
- послідовне обчислення  $G_1$ ,  $R_{AC}$  і  $\text{tg}\delta_{AC}$  за допомогою виразів (42, 41).

Розроблений в розділі метод визначення індивідуальних параметрів електричної ємності та  $\text{tg}\delta$  шарів фазної ізоляції трьохжильних силових кабелів з паперовою імпрегнованою ізоляцією в спільній металевій оболонці адаптовано для вирішення задачі визначення часткових ємностей в конструкціях ємнісних об'єктів контролю з 3 електродами.

В шостому розділі наведено ілюстрацію впливу паразитної індуктивності ємнісних об'єктів контролю на результати вимірювання їх електричної ємності, наведено розроблені схемотехнічні рішення для побудови елементів вимірювачів електричної ємності та  $\text{tg}\delta$ , побудованих на застосуванні перетворювачів напруги в струм, проведено теоретичний аналіз впливу паразитної індуктивності ємнісних об'єктів контролю на роботу таких вимірювачів, розроблено метод вимірювання

паразитної індуктивності в режимі їх аперіодичного розряду.

Розроблений метод вимірювання паразитної індуктивності передбачає розділення напруги на паразитній індуктивності та ємності досліджуваного об'єкта контролю, сума яких вимірюється із перетворювача струму в напругу, який одночасно використовувався для забезпечення аперіодичного режиму розряду конденсатора. Можливість розділення складових напруги на ємності об'єкту контролю та на його паразитній індуктивності проілюстрована наведеними на рисунку 16 результатами розрахунку нормованого скалярного добутку між цими компонентами за різних значень активного опору розрядного ланцюга для випадку аперіодичного режиму розряду досліджуваної ємності. Наведені розрахунки проведені за формулою із змінною нижньою границею інтегрування  $a_1$ .

$$\rho = \frac{\int_{a_1}^b u_C(t)u_L(t)dt}{\sqrt{\int_{a_1}^b u_C^2 dt} \cdot \sqrt{\int_{a_1}^b u_L^2(t)dt}}, \quad (62)$$

де  $u_C(t)$  – напруга на ємності досліджуваного об'єкта контролю,  $u_L(t)$  – напруга на його паразитній індуктивності.

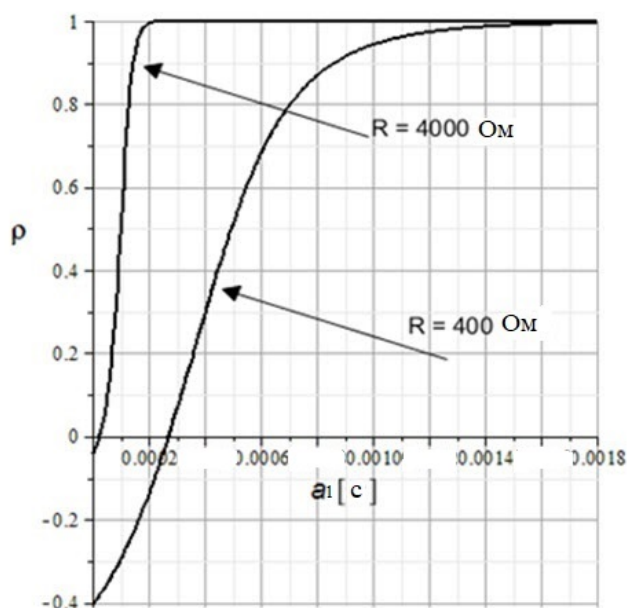


Рисунок 16 – Нормований скалярний добуток складових напруги на паразитній індуктивності та ємності об'єкта контролю, визначений для змінної нижньої межі інтегрування  $a_1$ .

Для діапазону значень параметру  $a_1$ , для якого розрахований за формулою (62) коефіцієнт складає  $\rho = 1$ , розділення складових напруги на ємності та паразитній індуктивності є ускладненим. В той же час, згідно із проведеними в розділі дослідженнями, за значення параметру  $a_1$  для якого розрахований коефіцієнт складає  $\rho = 0$  розділення складових напруги є можливим та у випадку незначної

індуктивності розрядного ланцюга дозволяє визначити невідому індуктивність об'єкту контролю. Згідно із проведеними в розділі дослідженнями показано, що у випадку апроксимації кривих розрядного струму для режиму аперіодичного розряду ємності за методом найменших квадратів у вигляді суми двох експонент значення параметру  $a_1$  може бути розраховане за формулою

$$a_1 = \frac{\ln \left( -\frac{C_1 B_1 (B_1 + D_1)}{A_1 (B_1^2 + D_1^2 \pm \sqrt{B_1^4 + D_1^4 - B_1^3 D_1 - B_1 D_1^3})} \right)}{B_1 - D_1}. \quad (63)$$

де параметри  $A_1$ ,  $B_1$ ,  $C_1$ ,  $D_1$  – визначаються за методом найменших квадратів при апроксимації кривої розрядного струму у вигляді суми двох експонент. Практична реалізація розробленого методу проілюстрована для випадку наведеної на рисунку 17 кривої розрядного струму.

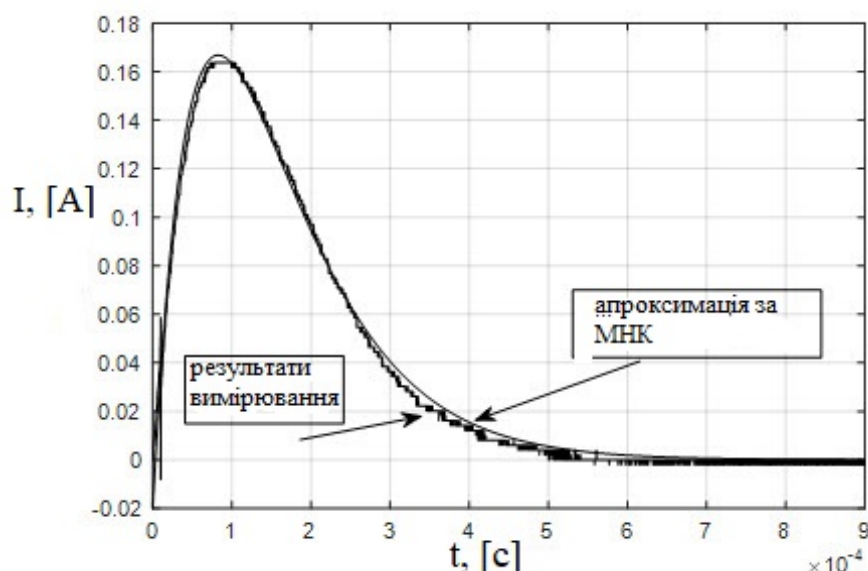


Рисунок 17 – Криві розрядного струму, що використовувались при розрахунку паразитної індуктивності.

Параметри розрядного ланцюга, для яких проведені розрахунки паразитної індуктивності наведені в таблиці 3. При проведенні вимірювань паразитна індуктивність імітована шляхом послідовного підключення до досліджуваної ємності соленоїду.

Результати визначення за методом найменших квадратів коефіцієнтів  $A_1$ ,  $B_1$ ,  $C_1$ ,  $D_1$  а також розраховані значення параметру  $a_1$  та паразитної індуктивності наведені в таблиці 4.

Таблиця 3 – Параметри розрядного ланцюга

Параметр	Значення
$R_1$ , (за частоти 1000 Гц), [Ом]	7.86
$L_1$ (за частоти 1000 Гц), [Гн]	$1296 \cdot 10^{-6}$
$C_1$ (за частоти 1000 Гц), [Ф] (ємність досліджуваного об'єкта контролю)	$4.737 \cdot 10^{-6}$
$R_2$ [Ом]	19.6
$R$ [Ом] (опір перетворювача струму в напругу)	995.02

Таблиця 4 – Результати обробки кривих розрядного струму

Параметр	Значення
$A_1$	-14.16
$B_1$	$-1.278 \cdot 10^4$
$C_1$	14.14
$D_1$	$-1.236 \cdot 10^4$
$a_1$ (с)	$32 \cdot 10^{-6}$
$L$ (Гн)	$1156 \cdot 10^{-6}$

Також в розділі проведено аналіз основних факторів, що впливають на точність визначення паразитної індуктивності за розробленою методикою.

Результати дисертаційної роботи впроваджено на ДП «Завод «Електроважмаш», ТОВ «ООВ «Сертатом», асоціації виробників кабельної продукції «Укрелектрокабель» та технічному комітеті № 131 «Електроізоляційна та кабельна техніка» Держспоживстандарту України.

У **додатках** наведено акти впровадження результатів дослідження, список публікацій здобувача за темою дисертації,

## ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішено науково-технічну проблему розвитку методів контролю технічного стану електричної ізоляції за параметрами її електричної ємності та тангенса кута діелектричних втрат шляхом зменшення впливу паразитних параметрів досліджуваного шару ізоляції на результати вимірювання, оцінювання величини паразитних параметрів ємнісних об'єктів контролю а також підвищення завадостійкості вимірювань за рахунок вдосконалення алгоритмів обробки кривих струму та напруги на досліджуваному об'єкті контролю.

1. Актуальність вдосконалення існуючих методів контролю технічного



стану електричної ізоляції електроенергетичного та телекомунікаційного обладнання за значеннями їх електричної ємності та тангенса кута діелектричних втрат зумовлена тим, що саме ці параметри електричної ізоляції значною мірою визначають діагностичні критерії, отримані при застосуванні інших методів контролю. Так, поляризаційні процеси в діелектрику та відповідні значення електричної ємності впливають на діагностичні параметри, визначені при застосуванні абсорбційних методів контролю та при діелектричній спектроскопії електричної ізоляції. Основними шляхами вдосконалення цих методів контролю при діагностиці технічного стану електричної ізоляції силових кабелів є усунення впливу паразитних параметрів досліджуваного об'єкту контролю на результати вимірювань та підвищення завадостійкості, шляхом вдосконалення математичних алгоритмів обробки кривих струму та напруги.

2. Розроблено метод оцінювання паразитної індуктивності ємнісних об'єктів контролю для випадку аперіодичного режиму розряду їх ємності. Розроблений метод передбачає розділення падіння напруги на ємності та паразитній індуктивності за рахунок встановленої умови для ортогональності цих складових.

3. Розроблено модифікацію кореляційного методу вимірювання фазового зсуву, що передбачає розрахунок декількох скалярних добутків досліджуваних сигналів струму та напруги із допоміжним гармонічним сигналом із нульовою початковою фазою та різними частотами. Зазначений розрахунок скалярних добутків еквівалентний розкладанню кожного з сигналів із застосуванням синус перетворення Фур'є, проте частоти допоміжних тригонометричних функцій, за якими розкладається сигнал, вибираються із умови усунення внеску ортогональних гармонічних складових в частотну залежність розрахованих скалярних добутків. Результати порівняльного аналізу завадостійкості розробленої модифікації та класичного кореляційного методу показали, що розроблена модифікація має вищий рівень завадостійкості в діапазоні значень фазового зсуву від  $0^\circ$  до  $45^\circ$ , в той же час в діапазоні значень фазового зсуву від  $45^\circ$  до  $90^\circ$  вищий рівень завадостійкості має класичний кореляційний метод.

4. Дисперсія результатів вимірювання часткових ємностей ізоляції трьохжильних силових кабелів з паперовою ізоляцією в спільній металевій оболонці, отриманих із застосуванням сукупних вимірювань в деяких випадках може визначатись складовими, що зумовлені кореляційними зв'язками між результатами вимірювання сукупних значень електричної ємності, отриманими із застосуванням різних схем обстеження силового кабелю.

5. Розроблений метод контролю електричної ємності та тангенса кута діелектричних втрат міжфазних шарів ізоляції трьохжильних силових кабелів в спільній металевій оболонці передбачає резистивно-ємнісне заземлення досліджуваного шару ізоляції із наступним регулюванням опору резистора, через який заземлено досліджуваний шар ізоляції. Регулювання здійснюється до значення опору, за якого фазовий зсув між напругою на досліджуваному шарі ізоляції та на резисторі, через який заземлено ізоляційний прошарок буде дорівнювати  $0^\circ$ . Після зазначеного регулювання на основі виміряних значень напруги на досліджуваному шарі ізоляції та на резисторі, через який заземлено ізоля-

ційний прошарок, розрахунковим шляхом визначаються значення електричної ємності та тангенса кута діелектричних втрат досліджуваного шару ізоляції. Регулювання величини електричного опору, за якого фазовий зсув між напругою на досліджуваному шарі ізоляції та на резисторі, через який заземлено ізоляційний прошарок, буде дорівнювати  $0^\circ$  здійснюється за допомогою вибору величини електричної ємності, що шунтує відповідний резистор.

6. Розроблена методика визначення часткових ємностей та тангенса кута діелектричних втрат шарів ізоляції між жилами трьохжильного силового кабелю адаптована для визначення часткових ємностей об'єктів контролю із 3 електродами. Зазначена адаптація заснована на застосуванні способу підключення джерела випробувальної напруги до досліджуваного об'єкту контролю, завдяки якому одна із паразитних ємностей підключена паралельно по відношенню до досліджуваного шару ізоляції та іншої паразитної ємності, що дає можливість уникнути її впливу на падіння напруги на досліджуваному шарі ізоляції та заземлюючому резисторі.

7. До специфічних особливостей часових рядів результатів вимірювання електричної ємності та тангенса кута діелектричних втрат кабелів на основі витих пар відноситься можливість збільшення тангенса кута діелектричних втрат разом із одночасним збільшенням електричної ємності, що суперечить функціональній залежності між цими параметрами для випадку паралельної схеми заміщення ємнісного об'єкту контролю з діелектричними втратами.

8. Результати дисертаційної роботи впроваджено в технічному комітеті № 131 «Електроізоляційна та кабельна техніка» Держспоживстандарту України, ДП «Завод «Електроважмаш», ТОВ «ООВ «Сертатом» та Українській асоціації «Укрелектрокабель».

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Kostiukov I. Estimation of capacitors stray inductance by the analysis of overdamped discharge current curves. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2021. No. 4. P. 175 – 179. **(Scopus)**

2. Kostiukov I. Sine Fourier transform-based frequency estimation. *IEIE Transactions on Smart Processing and Computing*. 2022. No. 1. P. 14 – 23. **(Scopus)**

3. Костюков И. А., Гурин А. Г. Влияние активного сопротивления обмоток импульсного трансформатора на параметры формируемых на емкостной нагрузке импульсов напряжения. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2019. № 5. С. 45–49. **(Scopus)**

*Здобувачем проведено розрахунки для аналізу перехідних процесів в імпульсному трансформаторі та огляд технічних рішень щодо формування високовольтних випробувальних імпульсів на ємнісному навантаженні.*

4. Костюков И. А., Беспрозванных А. В., Рогинский А. В. Характеристики корпусной электроизоляционной системы асинхронных электрических машин на резонансной частоте. *Технічна Електродинаміка*. 2019. № 4. С. 48–55. **(Scopus)**

*Здобувачем проведено аналіз методів контролю технічного стану електричної ізоляції.*

5. Костюков И. А. Беспрозванных А. В. Погрешность контроля электроизоляционных конструкций по параметрам диэлектрической абсорбции в соответствии с концепцией неопределенности измерений. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2020. № 1. С. 47–51. **(Scopus)**

*Здобувачем проведено аналіз метрологічних характеристик вимірювача іммітансу.*

6. Костюков И. А., Беспрозванных А. В. Метод вейвлет анализа временных рядов параметров диэлектрической абсорбции электроизоляционных конструкций. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2020. № 2. С. 52–57. **(Scopus)**

*Здобувачем проведено спектральний аналіз часових рядів результатів вимірювання тангенса кута діелектричних втрат.*

7. Костюков І.О. Особливості оцінювання часткових ємностей ізоляції трьохжильних силових кабелів із застосуванням сукупних вимірювань *Український метрологічний журнал*. 2021. № 1. С. 41 – 46. **(Web of Science)**

8. Костюков І. О. Беспрозванных Г. В., Пушкар О. А. Синтез конструктивно-технологічних рішень регулювання робочої ємності кабелів промислових мереж. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2021. № 1. С. 44–49. **(Scopus)**

*Здобувачем проведено аналіз шляхів регулювання робочої ємності кабелів на основі витих пар.*

9. Костюков І. О., Беспрозванных Г. В. Розрахункова модель для визначення комплексного опору силових високовольтних одножильних кабелів з полімерною ізоляцією. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2021. № 3. С. 47–51. **(Scopus)**

*Здобувачем проведено розрахунки частотної залежності індуктивності жили силового кабелю.*

10. Костюков І. О. Беспрозванных Г. В., Москвітін Є. С. Розділення абсорбційних процесів в неоднорідній ізоляції за кривими відновлюваної напруги силових високовольтних кабелів. *Технічна Електродинаміка*. 2021. № 6. С. 13-19 **(Scopus)**

*Здобувачем проведено аналіз та фізична інтерпретація результатів вимірювання відновлюваної напруги на досліджуваному об'єкті контролю.*

11. Костюков И. А., Гурин А. Г., Москвитин Е. С., Скибин В. П., Гонтарь Ю. Г. Неразрушающий метод определения неоднородностей в изоляционном материале линейных изоляторов и концевых разделках силовых кабелей. *Вісник Національного технічного університету “ХПІ”*. 2017. № 31 (1253). С. 25 – 28.

*Здобувачем проведено обґрунтування фізичних основ розробленого методу та проведено спектральний аналіз отриманих осцилограм імпульсів напруги.*

12. Kostiukov I. O. Deterioration of XLPE insulation in high voltage cable systems and testing of quality by applying pulses of high voltage. *Вісник Національного технічного університету “ХПІ”*. 2019. №. 1. P. 36 – 41.

13. Костюков И. А. Особенности преобразования некоторых сигналов с использованием  $RC$  цепочек. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ"*. 2019. № 29 (1354). С. 87 – 90.

14. Kostiukov I. O. The influence of stray inductance of tested object on technical performance of electrical capacitance meters with phase detectors. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ"*. 2019. № 2. Р. 64 – 69.

15. Kostiukov I. O. The influence of stray inductance of storage capacitor and load capacitance on transients in high voltage facilities with pulse transformers. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ" Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика*. 2020. № 1. Р. 43 – 46.

16. Kostiukov I. Electrical capacitance measurement by scatter ellipse approximation. *Вимірювальна техніка та метрологія*. 2020. № 3. Р. 41 – 46.

17. Kostiukov I. O. Estimation of sine signals amplitude by the least squares method: a comparative analysis of accuracy of ellipse fitting algorithms. *Метрологія та прилади*. 2020. № 4. Р. 56 – 62.

18. Костюков І. О., Гонтар Ю.Г. Аналіз моделей для оцінювання впливу поверхневого ефекту на величину активного опору суцільних та багатопроволочних жил силових кабелів. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ" Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика*. 2020. № 2. С. 43 – 46.

*Здобувачем проведено розрахунки фазових кутів комплексного опору жили силового кабелю.*

19. Костюков І.О. Особливості розрахунку дисперсії результатів визначення часткових ємностей ізоляції трьохжильних силових кабелів із застосуванням сукупних вимірювань. *Метрологія та прилади*. 2021. № 1. Р. 65 – 71.

20. Костюков І. О., Москвитин Е.С. Зменшення впливу паразитної індуктивності досліджуваного об'єкта контролю на точність вимірювання його електричної ємності. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ" Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика*. 2021. № 1. С. 52 – 57.

*Здобувачем розроблено метод зменшення впливу паразитної індуктивності ємнісного об'єкта контролю на результати вимірювання електричної ємності.*

21. Костюков І. О. Абсорбційні методи контролю технічного стану електричної ізоляції. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ" Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика*. 2021. № 2. С. 45 – 50.

22. Kostiukov I. Dielectric dissipation factor in three-core power cables *Вимірювальна техніка та метрологія*. 2021. № 2. С. 50 – 56.

23. Kostiukov I. Measurement of dissipation factor of inner layers of insulation in three-core belted cables. *Lighting engineering and power Engineering*. 2021. No. 1. Р. 23 – 30.

24. Kostiukov I The evaluation of electric power by separate analysis of Fourier transform components *Lighting engineering and power Engineering*. 2021. No. 3. P. 133 – 139.

25. Kostiukov I. Quadrature phase shifter for the measurement systems of testing of electrical insulation. *Вісник Національного технічного університету “ХПІ” Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика*. 2022. № 1. С. 42 – 45.

26. Костюков І.О., Кубрик Б.І. Методика вимірювання часткових ємностей для об’єктів контролю із трьома електродами. *Вісник Національного технічного університету “ХПІ” Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика*. 2023. № 1. С. 67 – 70.

*Здобувачем розроблено метод визначення часткових ємностей для об’єктів контролю із трьома електродами.*

27. Kostiukov I. Estimation of Dissipation Factor by Applying Cross-Correlation Method. Proc. of 2020 IEEE KhPI Week, Kharkiv, 2020. P. 333–338. (**Scopus**)

28. Kostiukov I. The analysis of some results of electrical capacitance and dissipation factor measurements. Proc. of 2021 IEEE International Conference on Robotics, Electrical and Signal Processing Techniques (ICREST) DHAKA, P. 510 – 514. (**Scopus**)

29. Kostiukov I. Interval frequency estimation by cross-correlation analysis *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol.1878. P. 012011. (**Scopus**)

30. Kostiukov I. Decreasing of bias of modified cross-correlation method for phase shift measurement. Proc. of 2022 IEEE KhPI Week, Kharkiv, 2022. P. 267–272. (**Scopus**)

31. Костюков І. О. Лабораторний стенд для вимірювання електричної ємності ізоляції електроенергетичного обладнання. Матеріали XXVI Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка технологія здоров’я освіта MicroCAD 2018р.».–Харків: НТУ «ХПІ», 2018. С. 150

32. Костюков І. О. Модель для визначення впливу втрат потужності в первинній та вторинній обмотках імпульсного трансформатора на параметри напруги на ємнісному навантаженні. Матеріали XXVII Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка технологія здоров’я освіта MicroCAD 2019р.».–Харків: НТУ «ХПІ», 2019. С. 153

33. Костюков І. О. Підвищення точності вимірювання електричної ємності шляхом визначення постійної часу розряду конденсатора. Матеріали III Міжнародної науково-технічної конференції «Енергоефективність та енергетична безпека електроенергетичних систем».–Харків: НТУ «ХПІ», 2019. С. 110–111

34. Костюков І. О. Вимірювання паразитної індуктивності ємнісних об’єктів контролю в режимі їх аперіодичного розряду. Матеріали XXIX Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка технологія здоров’я освіта MicroCAD 2021р.».–Харків: НТУ «ХПІ», 2021. – С. 124.

## АНОТАЦІЇ

**Костюков І.О. Розвиток методів контролю технічного стану електричної ізоляції за параметрами ємності та тангенса кута діелектричних втрат.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2023 р.

Дисертацію присвячено розвитку методів контролю технічного стану електричної ізоляції електроенергетичного та телекомунікаційного обладнання за параметрами її електричної ємності та тангенса кута діелектричних втрат за рахунок зменшення впливу паразитних індуктивних та ємнісних параметрів досліджуваних об'єктів контролю на результати вимірювання а також вдосконалення алгоритмів обробки кривих струму та напруги і числових рядів результатів вимірювань.

В дисертації розроблено модифікацію кореляційного методу вимірювання фазового зсуву, що дозволило збільшити завадостійкість розрахунку тангенса кута діелектричних втрат в діапазоні значень від  $0^\circ$  до  $45^\circ$ . Розроблено метод вимірювання електричної ємності та тангенса кута діелектричних втрат трьохжильних силових кабелів з паперовою імпрегнованою ізоляцією. Розроблений метод передбачає резистивно-ємнісне заземлення досліджуваного фазного шару ізоляції із наступним вимірюванням напруги на досліджуваному шарі ізоляції та між однією із жил кабелю та його заземленою оболонкою для формування системи рівнянь, вирішення якої дозволяє визначити невідомі значення ємності та тангенса кута діелектричних втрат. Також в дисертації проаналізовано специфічні особливості часових рядів та амплітудних спектрів результатів вимірювання електричної ємності та тангенса кута діелектричних втрат екранованих та неекранованих телекомунікаційних кабелів на основі витих пар, наведено схемотехнічні рішення по побудові елементів вимірювачів електричної ємності, побудованих на застосуванні перетворювачів напруги в струм, розроблено метод вимірювання паразитної індуктивності ємнісних об'єктів контролю для їх аперіодичного режиму розряду.

*Ключові слова:* старіння електричної ізоляції, паразитна ємність, паразитна індуктивність, цифрова обробка сигналів, сукупні вимірювання, контроль промислового обладнання.

**Kostiukov I.O. Development of methods of controlling the technical condition of electrical insulation by the parameters of capacitance and dielectric dissipation factor.** – Manuscript.

Thesis for obtaining the scientific degree of Doctor of Technical Sciences in the field – 05.11.13 - devices and methods of control and determination of the com-

position of substances. National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, 2023.

The dissertation work is devoted to the solution of the problem of development of methods of monitoring the technical condition of electrical insulation according to the parameters of its electrical capacity and tangent of the dielectric loss angle.

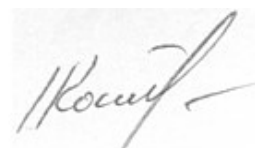
In the first chapter of the dissertation, based on a critical analysis of physical models of aging of electrical insulation under the influence of adverse operating factors, the most common methods of controlling the insulation of power cables by applying high voltage pulses, measuring the level of partial discharges, absorption methods of control, measuring its electrical capacity and the tangent of the angle of dielectric losses, as well as methods of the theory of digital signal processing, which are used both in the analysis of numerical series of the obtained measurement results and directly in the systems for measuring the capacitance and tangent of the dielectric loss angle, the main tasks of the dissertation research are formulated. In the second chapter, using the example of the analysis of the numerical series of the results of the measurement of the electric capacity and the tangent of the dielectric loss angle, it is shown that the physical interpretation of the results obtained by analyzing the  $C\text{-tg}\delta$  diagrams can be complicated due to the simultaneous growth of these parameters, which contradicts the functional dependence between these parameters for the case of electrical insulation application of a parallel scheme for replacing the investigated capacitive object of control with dielectric losses. Taking into account the mentioned difficulties, in order to identify the presence of hidden oscillations in the obtained results, it is proposed to carry out a spectral analysis of numerical series. Using the example of harmonic signals, a method of interval estimation of the frequency of such hidden oscillations has been developed, which allows to reduce the influence of the spread of the spectrum of signals on the accuracy of estimation of their parameters. A spectral analysis of numerical series of the results of measuring the tangent of the dielectric loss angle was carried out and it was shown that the application of the proposed selection of frequencies of auxiliary trigonometric functions by which the investigated signal is decomposed allows to double the resolution of the Fourier transform without the traditional addition of zeros to the investigated numerical sequence and to halve the number of necessary calculations. by refusing to decompose the investigated signal using a complete system of orthogonal trigonometric functions.

In the third section, a modification of the correlation method for measuring the phase shift was developed in order to improve the interference resistance of measurements of the tangent of the dielectric loss angle for control objects with a relatively low  $Q$  level. The developed modification requires calculations of several scalar products of the studied current and voltage signals with auxiliary trigonometric functions. The results of the comparative analysis of immunity showed that, compared to the traditional correlation method of measuring the phase shift, the developed modification made it possible to increase the immunity of the measurement of the phase shift between the current and voltage curves and, accordingly, the tangent of the dielectric loss angle in the range of values from  $0^\circ$  to  $45^\circ$ . At the same time, in the range from  $45^\circ$  to  $90^\circ$ , the classic correlation method of measuring the phase shift has a higher level of immunity compared to its developed modification. The fourth chapter ana-

lyzes the peculiarities of measuring the individual parameters of the dielectrics of each layer of insulation in three-core power cables with paper-impregnated insulation. The possibility of the existence of correlations between the results of measurements of the aggregate values of the electric capacity, which were obtained when using different methods of connecting the conductive elements of the power cable structure, is shown. The component variances of the results of the measurement of the partial insulation capacities of three-core power cables were analyzed and the formulas for the direct calculation of the values of the tangent of the dielectric loss angle using aggregate measurements were obtained. In the fifth chapter, based on the modified connection schemes of the conductive elements of the construction of the three-wire power cable in a common metal sheath, a method of measuring the electrical capacity and  $\text{tg}\delta$  of each of its insulation layers is developed. The developed modification of the existing inspection schemes provides for resistive or resistive-capacitive grounding of the tested insulation layer. Determination of unknown insulation parameters is carried out by adjusting the value of the electrical resistance through which the investigated insulation layers are grounded, until the moment of zero phase shift between the voltage on the investigated insulation layer and on its grounding elements, followed by the measurement of these voltages.

In the sixth chapter, a theoretical analysis of the effect of the parasitic inductance of the investigated capacitive control object on the results of measuring the electric capacity and the tangent of the dielectric loss angle for the measurement circuit based on a voltage-to-current converter and a phase detector is carried out, solutions are given for the development of circuits for shifting the phase of harmonic signals by  $90^\circ$ , developed a methodology for estimating the parasitic inductance of capacitive control objects for their aperiodic discharge mode.

*Keywords:* aging of electrical insulation, parasitic capacitance, parasitic inductance, digital signal processing, aggregate measurements, control of industrial equipment.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Kouy' or similar, located in the bottom right corner of the page.