

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

Коробко Олександр Анатолійович



УДК 621.317.39

**УДОСКОНАЛЕННЯ РЕЗОНАНСНОГО ДІЕЛЬКОМЕТРИЧНОГО
МЕТОДУ КОНТРОЛЮ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ВОЛОГОСТІ РІДКИХ
НЕПОЛЯРНИХ ДІЕЛЕКТРИКІВ**

Спеціальність: 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення
складу речовин

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі інженерної електрофізики Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник доктор технічних наук, старший науковий співробітник,
Баранов Михайло Іванович,
Національний технічний університет
“Харківський політехнічний інститут”,
Науково-дослідний та проектно-
конструкторський інститут “Молнія”,
головний науковий співробітник.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Большаков Володимир Борисович,
“Академія метрології України”, м. Харків,
Віце-президент;

кандидат технічних наук, доцент
Хорошайло Юрій Євгенович,
Харківський національний
університет радіоелектроніки,
доцент кафедри інформатики.

Захист відбудеться 23 травня 2019 року о 14³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.09 у Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут” за адресою: 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2.

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

Автореферат розіслано 19 квітня 2019 р.

Вчений секретар
спеціалізованої ради



І. О. Костюков

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Методи неруйнівного контролю широко застосовуються для визначення якості різних рідин. Одним із варіантів неруйнівного контролю фізичних властивостей рідких середовищ є дієлькометричний метод кількісного визначення вмісту в них сторонніх вкраплень у вигляді забрудненості. Метод резонансної дієлькометрії передбачає використання вимірювального перетворювача (ВП) ємнісного типу, робочий простір якого заповнений досліджуваною рідиною. У розвиток дієлькометрії внесли значний вклад такі вітчизняні та іноземні вчені, як: М. А. Берлінер, Ф. Еме, А. Р. Хіппель, А. Векслер (A. Wexler), Г. Дж. В. Вишер (G. J. W. Vischer), С. Хасегава (S. Hasegawa), В. К. Бензарь, А. А. Брант, М. В. Венедиктов, Є. С. Кричевський та інші. Нажаль, теоретичні та практичні аспекти питань підвищення чутливості дієлькометричного методу для вимірювання малих величин вологості, не знайшли достатнього відображення у відомих роботах по дієлькометрії.

Типовими відомими прикладами актуальних завдань по визначенню величини забрудненості у таких випадках є визначення об'ємного вмісту води (вологості) в трансформаторному маслі та в авіаційному гасі, коли вода знаходиться в емульгованому стані в об'ємі досліджуваної рідини, бо збільшення вологості трансформаторного масла призводить до суттєвого зниження його пробійної напруженості, а збільшена вологість авіаційного гасу – до катастрофічного погіршення його експлуатаційних характеристик. Для ефективного контролю якості неполярних рідин у даних випадках необхідно забезпечити вимірювання об'ємного вмісту вологи на дуже малому рівні: близько 10^{-5} (10 мл/м³), що потребує як врахування впливу паразитних параметрів ВП (паразитних ємностей), так і розробки нових ВП з підвищеною чутливістю.

Іншою проблемою, яка виникає в практиці дієлькометрії, є так звана проблема “сортової невизначеності”. Вирішенням цієї проблеми займалися такі вчені, як: Е. М. Бромберг, Ю. М. Туз, Б. С. Сотсков, К. Л. Куліковський, С. І. Кондрашов, В. І. Шевченко, А. П. Гридасов, А. В. Заболотний, К. Ю. Голуб та інші. Вона полягає в тому, що результати вимірювання вологості залежать від величини діелектричної проникності рідкого неполярного діелектрика, тобто від його сорту. Відомі два напрямки мінімізації впливу “сортової невизначеності”: перший – попередня калібровка приладів вимірювання вологості (вологомірів) у тому, чи іншому вигляді відповідно до конкретного сорту досліджуваної рідини; другий – застосування математичних моделей забруднених водою неполярних рідин (емульсій), що аналітично зв'язують величини діелектричної проникності емульсії, неполярного рідкого діелектрика, води та об'ємного вмісту води в емульсії. На теперішній час відома велика кількість моделей емульсій, але їх недоліки не дозволяють застосовувати їх для вимірювання вологості на рівні 10^{-5} (10 мл/м³). Недоліки відомих методів мінімізації впливу “сортової невизначеності” не дозволяють їх використовувати для практичної реалізації в зазначених випадках.

Таким чином, вибір виду та дослідження максимально спрощеної моделі емульсії для розробки нових багаточастотних різновидів резонансного дієлько-

метричного методу вимірювання вологості неполярних рідких діелектриків з одночасною мінімізацією впливу “сортової невизначеності”, а також реалізація вологомірів з підвищеною чутливістю до рівня 10^{-5} (10 мл/м³) є досить актуальною науково-практичною задачею, яка визначає напрямок досліджень дисертаційної роботи.

Зв'язок з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана відповідно до наукових напрямків кафедри інженерної електрофізики та НДПКІ “Молнія” Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” згідно з держбюджетною темою “Забезпечення енергетичної безпеки України шляхом підвищення надійності роботи стратегічних енергооб’єктів в нормальному та аварійному режимах” (номер державної реєстрації №0117U000534), в якій автор приймав участь в якості виконавця окремих етапів.

Мета та задачі досліджень. Метою досліджень є розробка та реалізація нових багаточастотних різновидів резонансного діелькометричного методу вимірювання вологості емульсій типу “неполярний рідкий діелектрик – вода” з підвищенням його чутливості до рівня 10^{-5} (10 мл/м³) та одночасною мінімізацією впливу “сортової невизначеності” на результати вимірювання.

Для досягнення поставленої мети сформульовані наступні завдання:

- провести аналіз існуючих методів та засобів реалізації діелькометричного методу взагалі та резонансного його різновиду для вимірювання вологості неполярних рідких діелектриків, визначити їх недоліки та можливості застосування в роботі;

- обрати максимально спрощену математичну модель емульсії, що відповідає вимогам покращення чутливості резонансного діелькометричного методу з одночасною мінімізацією впливу “сортової невизначеності”, визначити її області застосування по частоті та величині вологості, а також величини її систематичних похибок;

- запропонувати, розробити та реалізувати нові багаточастотні різновиди резонансного діелькометричного методу вимірювання вологості неполярних рідких діелектриків на основі обраної моделі емульсії з урахуванням паразитних параметрів вимірювального генератора (ВГ) та ВП, провести аналіз областей застосування та визначити їх систематичні похибки, а також похибки, що обумовлені впливом дестабілізуючих факторів, визначити вимоги до засобів реалізації найбільш чутливого із запропонованих багаточастотних різновидів резонансного діелькометричного методу;

- запропонувати новий тип ВП з рівнем чутливості 10^{-5} (10 мл/м³) для реалізації розробленого найбільш чутливого багаточастотного різновиду резонансного діелькометричного методу, провести аналіз його основних характеристик та порівняльний аналіз з вимірювальними перетворювачами відомих типів;

- провести експериментальні дослідження характеристик нового типу ВП та аналіз можливості його застосування для резонансної діелькометрії рідких неполярних середовищ;

- розробити та створити діючі вологоміри СЧ та ДВЧ діапазонів для реалізації розроблених багаточастотних різновидів резонансного діелькометричного методу з мінімізацією впливу “сортової невизначеності”;

- розробити методику проведення експериментальних досліджень для реалізації запропонованих багаточастотних різновидів резонансного діелькометричного методу за допомогою створених вологомірів СЧ та ДВЧ діапазонів, провести експериментальні дослідження та порівняти результати теоретичних та експериментальних досліджень;

- провести оцінювання точності вимірювання вологості вологомірами СЧ та ДВЧ діапазонів стандартними методами;

- впровадити результати дисертаційної роботи у науково-промисловий комплекс України та навчальний процес вищого навчального закладу.

Об’єкт досліджень – процеси вимірювання вологості неполярних рідких діелектриків резонансним діелькометричним методом.

Предмет досліджень – методи та засоби покращення чутливості резонансного діелькометричного методу на основі нових розроблених багаточастотних його різновидів з мінімізацією впливу “сортової невизначеності” та нового типу ВП.

Методи досліджень. В процесі виконання дисертаційної роботи були застосовані аналітичні, чисельні та експериментальні методи. Серед них використані основні положення: теорії однорідних та неоднорідних діелектриків – для досліджень запропонованої математичної моделі емульсії та визначення її систематичних похибок; теорії антен – для визначення виду запропонованої спрощеної математичної моделі емульсії та її систематичних похибок; теоретичних основ електротехніки – для досліджень щодо запропонованих нових багаточастотних різновидів резонансного діелькометричного методу та визначення їх систематичних похибок; техніки НВЧ – для проведення теоретичних та експериментальних досліджень щодо нового запропонованого вимірювального перетворювача з розподіленими параметрами; чисельних методів імітаційного моделювання – для чисельного моделювання електромагнітних процесів у запропонованому вимірювальному перетворювачі з розподіленими параметрами; теорії подібності – для визначення впливу діелектричних втрат у компонентах емульсії на похибки визначення величини вологості. Результати експериментальних досліджень оброблялись стандартними методами теорії вірогідності та статистики згідно з ДСТУ–Н РМГ 43:2006.

Наукова новизна отриманих результатів

- одержав подальший розвиток математичний опис моделі емульсії типу “рідкий неполярний діелектрик – вода” на основі відомої радіотехнічної системи у вигляді штучного діелектрика, визначені області застосування обраної спрощеної моделі емульсії по частоті і вологості та її систематичні похибки, що дає можливість підвищити чутливість резонансного діелькометричного методу;

- запропоновані та розроблені нові багаточастотні різновиди резонансного діелькометричного методу на основі обраної моделі емульсії з урахуванням паразитних параметрів ВГ і ВП та мінімізацією “сортової невизначеності”, проведено аналіз областей застосування розроблених багаточастотних різновидів

резонансного дієлькометричного методу та визначені їх систематичні похибки, що дає можливість мінімізувати вплив “сортової невизначеності” та підвищити чутливість резонансного дієлькометричного методу;

– вперше запропоновано використання ступінчастого неоднорідного коаксіального резонатора (СНКР), як ВП розподіленого типу для реалізації найбільш чутливого двочастотного резонансного дієлькометричного методу, визначена його основна метрологічна характеристика, що дало змогу підвищити чутливість резонансного дієлькометричного методу.

Практичне значення отриманих результатів для галузей приладобудування, електротехніки, авіаційної, космічної і транспортної техніки та високовольтної техніки генерування надпотужних електромагнітних полів, струмів та напруг нано- та субнаносекундного діапазонів полягає у наступному:

– використання запропонованих багаточастотних різновидів резонансного дієлькометричного методу, спрощеної моделі емульсії та ВП у вигляді СНКР дозволило мінімум на порядок зменшити нижню границю вимірюваної вологості, суттєво зменшити величини невизначеності вимірювання вологості (мінімум у 3 – 10 разів) у порівнянні з відомими вологомірами та одночасно мінімізувати при цьому вплив “сортової невизначеності”;

– конструкції розроблених та створених вологомірів дозволяють вимірювати вологість неполярних рідких діелектриків до нижнього рівня $5 \cdot 10^{-4}$ (500 мл/м³) для СЧ вологоміра та 10^{-5} (10 мл/м³) для ДВЧ вологоміра та з верхнім рівнем 10^{-2} (10 л/м³) для обох типів вологомірів;

– запропоновані багаточастотні різновиди резонансного дієлькометричного методу та розроблені вологоміри можуть бути використані в харчовій, хімічній, нафтопереробній та інших галузях промисловості для вимірювання вологості рідких неполярних діелектриків, а також у галузях приладобудування, електротехніки, авіаційної, космічної і транспортної техніки для вимірювання вологості паливо-мастильних та технологічних рідин;

– запропоновані багаточастотні різновиди резонансного дієлькометричного методу та розроблені вологоміри можуть бути використані для визначення забрудненості провідними частками: трансформаторного масла у високовольтних масляних вимикачах в електроенергетиці, моторних та трансмісійних масел у транспортній техніці, трансформаторного масла в масляних розрядниках, що використовують електричний розряд у рідині (трансформаторному маслі) у високовольтній техніці генерування надпотужних електромагнітних полів, струмів та напруг нано- та субнаносекундного діапазонів;

– обрана спрощена модель емульсії може використовуватись для визначення електро- та теплофізичних властивостей композитних двофазних сумішей з суттєвою перевагою об’ємної кількості одного з компонентів та суттєвою різницею їх характеристик.

Результати дисертаційної роботи впроваджені в ДП КБ “Південне” ім. М. К. Янгеля” (м. Дніпро), ДП “Завод ім. В. О. Малишева” (м. Харків), ТОВ Науково-виробниче об’єднання “Контур” (м. Харків) та в навчальний процес кафедри інженерної електрофізики Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”.

Особистий внесок здобувача. Усі основні положення та результати, винесені на захист дисертаційної роботи, отримані здобувачем особисто. Серед них: вибір виду та теоретичний аналіз нової спрощеної математичної моделі емульсії типу “неполярний рідкий діелектрик – вода”, результати теоретичних досліджень визначення областей застосування обраної моделі емульсії по частоті та величині вологості, а також величинам її систематичних похибок; розробка та дослідження нових багаточастотних різновидів резонансного діелькометричного методу визначення вологості емульсії на основі обраної нової моделі емульсії з урахуванням паразитних параметрів ВГ і ВП та мінімізацією “сортової невизначеності”, результати аналізу їх областей застосування та систематичних похибок, що обумовлені впливом дестабілізуючих факторів; визначені вимоги до засобів та напрямків реалізації найбільш чутливого запропонованого двочастотного резонансного діелькометричного методу для забезпечення мінімальної величини відносної похибки вимірювання вологості; запропонований та досліджений новий тип розподіленого ВП – СНКР для реалізації найбільш чутливого двочастотного методу, а також результати визначення його основної метрологічної характеристики та порівняння СНКР з відомими класичними ВП у вигляді чвертьхвильових однорідних резонаторів; результати експериментальних досліджень по практичній реалізації запропонованих чотири- та тричастотних різновидів резонансного діелькометричного методу вимірювання вологості до рівня $5 \cdot 10^{-4}$ (500 мл/м³) вологоміром СЧ діапазону з одночасною мінімізацією “сортової невизначеності”, результати експериментальних досліджень по практичній реалізації запропонованого двочастотного методу вимірювання вологості до рівня 10^{-5} (10 мл/м³) вологоміром ДВЧ діапазону з ВП у вигляді СНКР з одночасною мінімізацією “сортової невизначеності”.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідались та отримали позитивні відгуки на Міжнародних науково-практичних конференціях: “Інформаційні технології: наука, техніка, технології, освіта, здоров’я” (Харків, 2009, 2011, 2014, 2017); науково-практичній студентській конференції з галузі “Електротехніка та електромеханіка” (Дніпродзержинськ, 2011); Міжнародних симпозіумах “Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика” (Харків, 2014, 2015, 2016).

Публікації. За результатами дисертації опубліковано 15 наукових праць, з них: 2 статті у фахових виданнях, включених до міжнародних наукометричних баз даних; 8 статей у фахових виданнях з переліку ДАК України; 5 тез доповідей у матеріалах міжнародних конференцій.

Структура та об’єм дисертації. Дисертаційна робота складається з анотації двома мовами, вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел інформації і додатків. Повний об’єм дисертації складає 170 сторінок, з них: 26 рисунків та 16 таблиць по тексту; список використаних джерел із 182 найменувань джерел на 22 сторінках; 2 додатки на 8 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність теми, сформовані мета, основні задачі, новизна та практична цінність отриманих результатів, наведені відомості по реалізації та апробації отриманих результатів, розкритий зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами.

У першому розділі проведено аналітичний огляд та аналіз існуючих методів та засобів реалізації діелькометричного методу взагалі і його резонансного різновиду для вимірювання вологості неполярних рідких діелектриків (математичних моделей емульсій, тестових методів для мінімізації “сортової невизначеності”, технічного рівня сучасних вологомірів та схемотехнічних засобів їх реалізації) для визначення їх недоліків та можливостей застосування у роботі. Визначені і обґрунтовані напрямки подальших досліджень: розробка спрощеної моделі емульсії з представленням крапель води в емульсії у вигляді ідеально провідних рівномірно розподілених сфер малого діаметра; розробка нових різновидів діелькометричного методу вимірювання вологості з мінімізацією впливу “сортової невизначеності” з урахування паразитних параметрів ВП та ВГ для вимірювання вологості на рівні 10^{-5} (10 мл/м³); розробка нового типу розподіленого ВП, що забезпечує досягнення мети роботи.

Другий розділ присвячений теоретичним дослідженням запропонованої спрощеної математичної моделі емульсії, що відповідає покращенню чутливості резонансного діелькометричного методу з одночасною мінімізацією впливу “сортової невизначеності”, а саме, визначенню її областей застосування по частоті, величині об'ємної вологості та величин її систематичних похибок, розробці нових багаточастотних різновидів резонансного діелькометричного методу визначення об'ємної вологості емульсії на основі запропонованої математичної моделі емульсії з урахуванням паразитних параметрів ВГ та ВП, аналізу областей застосування багаточастотних методів та визначенню їх систематичних похибок, що зумовлені впливом дестабілізуючих факторів.

Для запропонованої спрощеної моделі емульсії, яка була розроблена на основі моделі штучного діелектрика Кока, аналітичний зв'язок між діелектричною проникністю рідкого неполярного діелектрика $\varepsilon_{рнд}$, емульсії $\varepsilon_{емл}$ та вологістю W має наступний вигляд

$$\varepsilon_{емл} = \varepsilon_{рнд} (1 + 3W) . \quad (1)$$

На основі аналізу запропонованої моделі визначені її області застосування: по величині вологості $0 < W \leq 10^{-2}$ ($0 < W \leq 10$ л/м³); по частоті F у діапазоні $0 < F \leq 2$ МГц та у діапазоні $0,1$ ГГц $\leq F \leq 1$ ГГц; по величинам систематичних відносних похибок, що не перевищують 1% для першого діапазону та 2,55 % для другого діапазону. На основі моделі емульсії та аналізу узагальненої схеми заміщення ВП та ВГ (рис.1) запропоновані нові багаточастотні різновиди резонансного діелькометричного методу для покращення метрологічних характеристик традиційного резонансного діелькометричного методу (з урахуванням паразитних ємностей ВП та ВГ та одночасною мінімізацією “сортової невизначеності”). На рис. 1 наведені наступні позначення: L – індуктивний елемент ВГ; $C_{пвг}$ – паразитна ємність ВГ; $C_{нар}$ – паразитна конструктивна ємність ВП;

C – робоча ємність ВП; R – опір втрат. Метрологічні характеристики запропонованих методів отримані за умови $R = \infty$.

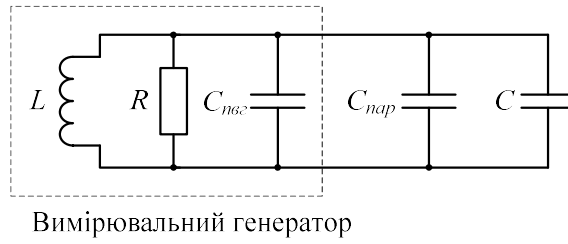


Рисунок 1 – Узагальнена еквівалентна схема заміщення ВП та ВГ

Суть запропонованих багаточастотних методів полягає у розрахунку величини вологості за відповідними виразами при послідовному виконанні наступних операцій по вимірюванню частот генерації ВГ: частоти $F_{пвг}$ при відключеному ВП; частоти $F_{пов}$ при підключеному ВП, який заповнено повітрям; частоти $F_{рнд}$ при підключеному ВП, що заповнений зневодненим рідким неполярним діелектриком; частоти $F_{емл}$ при підключеному ВП, що заповнений емульсією з невідомою вологістю.

Для узагальненого чотиричастотного методу ($C_{пвг} \neq 0$, $C_{нар} \neq 0$) вимірювання даних частот у сукупності з заданою величиною конструктивного коефіцієнта m , що характеризує частку паразитної ємності ВП у долях від його робочої ємності, дозволяє врахувати паразитні ємності ВП та ВГ з одночасною мінімізацією “сортової невизначеності”. Для тричастотного методу величини $C_{пвг} \neq 0$, $C_{нар} = 0$, $m = 0$. За його використання виникає систематична відносна похибка визначення вологості, що не перебільшує 2,7 % за умови, що величина m менша за 0,0664. Для двочастотного методу величини $C_{пвг} = 0$, $C_{нар} = 0$, $m = 0$, чим забезпечується його максимальну чутливість також у сукупності з мінімізацією впливу “сортової невизначеності”.

Основні метрологічні характеристики методів мають наступний вигляд:

$$\text{узагальнений чотиричастотний } W = \frac{F_{пов}^2 F_{рнд}^2 (F_{пвг}^2 - F_{емл}^2) - F_{пов}^2 F_{емл}^2 (F_{пвг}^2 - F_{рнд}^2)}{3 \left(F_{пов}^2 F_{емл}^2 (F_{пвг}^2 - F_{рнд}^2) - F_{рнд}^2 F_{емл}^2 (F_{пвг}^2 - F_{пов}^2) \frac{m}{m+1} \right)}; \quad (2)$$

$$\text{тричастотний } W = \frac{1}{3} \cdot \frac{F_{емл}^{-2} - F_{рнд}^{-2}}{F_{рнд}^{-2} - F_{пвг}^{-2}}; \quad (3)$$

$$\text{двочастотний } W = \frac{1}{3} \cdot \frac{F_{рнд}^2 - F_{емл}^2}{F_{емл}^2}; \quad (4)$$

$$\text{спрощений двочастотний } W \approx \frac{2}{3} \cdot \frac{F_{рнд} - F_{емл}}{F_{емл}}. \quad (5)$$

На основі аналізу впливу діелектричних втрат ($R \neq \infty$), на прикладі трансформаторного масла, як типового неполярного діелектрика, було встановлено, що вплив діелектричних втрат зменшується зі збільшенням частоти. Систематичні відносні похибки вимірювання об’ємної вологості $W = 0,01$ (10л/м³), що обумовлені впливом діелектричних втрат у зневодненому трансформаторному маслі та в емульсії не перевищують: $1,07 \cdot 10^{-4}$ для частоти генерації 0,1 МГц та $0,877 \cdot 10^{-4}$ для частоти 100 МГц. Це дозволяє знехтувати впливом діелектрич-

них втрат у зневодненому рідкому неполярному діелектрику та в емульсії при використанні трансформаторного масла в діапазоні вологості $10^{-5} - 10^{-2}$ ($10 \text{ мл/м}^3 - 10^4 \text{ мл/м}^3$).

На основі аналізу впливу зовнішніх дестабілізуючих факторів у вигляді можливої зміни температури, барометричного тиску та вмісту кількості розчиненого повітря встановлено, що зміна барометричного тиску практично не впливає на метрологічні характеристики багаточастотних методів. Вплив температури та розчиненого повітря має бути обов'язково врахований. Отримані у другому розділі результати підтвердили можливість використання запропонованих багаточастотних методів для досягнення мети роботи.

Третій розділ присвячений реалізації двочастотного різновиду резонансного дієлкометричного методу на основі ВП розподіленого типу у вигляді СНКР. На основі аналізу величини діелектричних втрат у воді визначена величина частоти $F_{емл} \approx 100 \text{ МГц}$, що відповідає максимальній чутливості двочастотного методу. Для його практичної реалізації (виконання умов $C_{нар} = 0, m = 0$) був запропонований новий ВП розподіленого типу у вигляді СНКР, схема заміщення якого у вигляді однорідних ліній Z_1 та Z_2 , що мають геометричну довжину l_1 та l_2 відповідно, наведена на рис. 2.

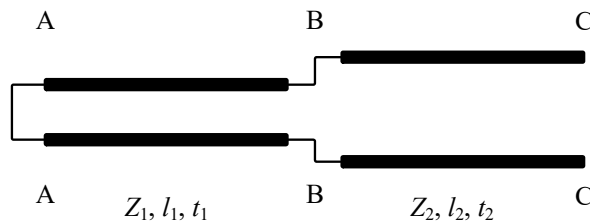


Рисунок 2 – Схема заміщення СНКР

Конструктивні коефіцієнти n_1 та n_2 визначені наступним чином $Z_2 = n_1 \cdot Z_1$ ($0 < n_1 < 1$); $l_2 = n_2 \cdot l_1$ ($n_2 > 0$). В результаті досліджень резонансних спектрів СНКР та класичного чвертьхвильового резонатора за однакових часів розповсюдження $t_1 = t_2$ по лініях визначені основні переваги СНКР: суттєво менша величина першої резонансної частоти; суттєво більша відносна розбіжність першої та другої резонансних частот.

В результаті теоретичного аналізу схеми заміщення СНКР (рис. 2) визначені його основні характеристики в функції діелектричної проникності міжелектродного простору СНКР та величин Z_1, n_1, n_2, l_1 : основна метрологічна характеристика і величина добротності. Результати даного аналізу також визначили основні переваги СНКР по відношенню до класичного однорідного чвертьхвильового резонатора та чвертьхвильового резонатора зі спіральним внутрішнім провідником по величині ненавантаженої добротності: за однакових резонансних частот та матеріалів СНКР має суттєво збільшене значення величини ненавантаженої добротності.

Крім цього, теоретично визначена величина конструктивного коефіцієнта $n_2 = 1$, за якої частота першого резонансу СНКР F_1' має мінімальне (екстремальне) значення. Також визначена частотна область застосування отриманих ре-

зультатів: величина F_1' має бути суттєво меншою за критичні частоти для хвиль вищих типів (ТЕ та ТН) у міжелектродному просторі СНКР. Результати теоретичних досліджень СНКР були перевірені експериментально – шляхом вимірювання амплітудно-частотних характеристик реального ВП на основі СНКР.

Отримані в третьому розділі результати підтвердили можливість використання запропонованого ВП у вигляді СНКР для досягнення мети роботи.

Четвертий розділ присвячений експериментальним дослідженням по реалізації запропонованих багаточастотних методів за допомогою вологомірів СЧ та ДВЧ діапазонів. При цьому вологомір СЧ діапазону з ВП зосередженого типу розроблявся для експериментальної перевірки чотири- та тричастотних методів, а вологомір ДВЧ діапазону з ВП розподіленого типу у вигляді СНКР – для експериментальної перевірки двочастотного методу. Загальний вигляд вологомірів СЧ та ДВЧ діапазонів наведено на рис. 3.

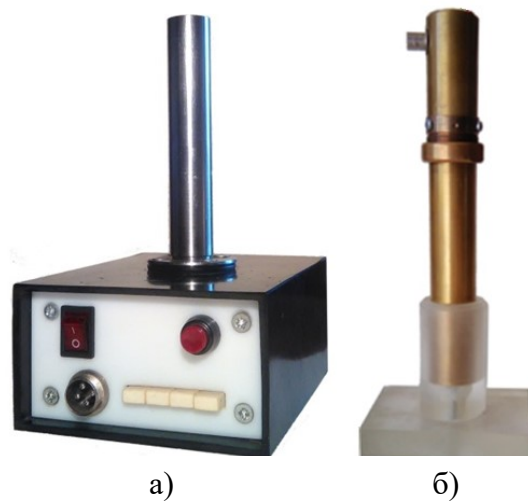


Рисунок 3 – Загальний вигляд вологомірів СЧ (а), ДВЧ (б)

Обидва вологоміра мають однакову функціональну схему: ВП ємнісного типу; ВГ у режимі вільних коливань, частота яких залежить від характеристик ВП. Розбіжності мають місце у конструкціях ВП та частотах генерації ВГ. Для вологоміра СЧ діапазону ВП був виконаний у вигляді коаксіального конденсатора з величиною $m = 0,0602$. При цьому частота ВГ не перевищувала 2 МГц. Для вологоміра ДВЧ діапазону ВП був виконаний у вигляді СНКР з величиною $m = 0$. При цьому частота ВГ приблизно становила величину 100 МГц. Схематичні рішення ВП та ВГ вологоміра ДВЧ діапазону забезпечували практично рівний нулю вплив паразитної ємності ВГ $C_{пвг}$ на метрологічні характеристики, що практично дозволило реалізувати найбільш чутливий двочастотний метод.

Для експериментальних досліджень була розроблена методика їх проведення, що включала в себе: вибір виду неполярного рідкого діелектрика, діапазону величин вологості тестових емульсій та методів їх виготовлення; мінімізацію експериментальних похибок; обробку отриманих експериментальних даних згідно діючих нормативних документів (ДСТУ) для визначення їх показників точності; аналіз отриманих результатів. Для мінімізації експериментальних похибок в розробленій методиці основна увага приділялась методу виготовлення

тестових емульсій, мінімізації впливу зовнішніх дестабілізуючих факторів та підвищенню точності отриманих результатів.

Тестові емульсії виготовлялись на основі трансформаторного масла відповідно до орієнтовних значень вологості емульсій W_{op} згідно обраного ряду: 10^{-5} (10 мл/м³); $5 \cdot 10^{-5}$ (50 мл/м³); 10^{-4} (0,1 л/м³); $5 \cdot 10^{-4}$ (0,5 л/м³); 10^{-3} (1 л/м³); $2 \cdot 10^{-3}$ (2 л/м³); $5 \cdot 10^{-3}$ (5 л/м³); 10^{-2} (10 л/м³). Згідно з характеристиками застосованих технічних засобів для виготовлення тестових емульсій, значення вологості виготовлених емульсій $W_{виг}$ та значення відносних розширених невизначеностей $\tilde{U}_{0,95}(W_{виг})$ для обраного ряду наведені в табл.1.

Згідно з ДСТУ–Н РМГ 43:2006 була складена схема визначення результатів вимірювання вологості, її розширеної невизначеності та проведені відповідні розрахунки. При цьому згідно з отриманими результатами була визначена необхідність урахування систематичних похибок спрощеної моделі емульсії.

Кінцеві результати експериментальних досліджень у вигляді: скоригованих значень величин вимірюваної вологості емульсії W ; величин відносної розширеної невизначеності $\tilde{U}_{0,95}(W) = 100 \cdot U_{0,95}(W)/W$; відносних різниць P величин вологості тестових емульсій $W_{виг}$ та величин вимірюваної вологості W ($P = 100 (W_{виг} - W)/W_{виг}$) для усіх реалізованих багаточастотних методів за допомогою СЧ та ДВЧ вологомірів наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Кінцеві результати експериментальних досліджень

$W_{виг}$		9,999 $\cdot 10^{-6}$	4,999 $\cdot 10^{-5}$	9,999 $\cdot 10^{-5}$	4,997 $\cdot 10^{-4}$	9,99 $\cdot 10^{-4}$	1,996 $\cdot 10^{-3}$	4,975 $\cdot 10^{-3}$	9,9 $\cdot 10^{-3}$
Метод									
Чотири- частотний	W	–	–	–	$5,285 \cdot 10^{-4}$	$1,011 \cdot 10^{-3}$	$2,005 \cdot 10^{-3}$	$5,035 \cdot 10^{-3}$	$1,035 \cdot 10^{-2}$
	$\tilde{U}_{0,95}, \%$	–	–	–	5,28	3,44	1,94	2,51	4,25
	$P, \%$	–	–	–	-5,76	-1,24	-0,45	-1,21	-4,57
Три- частотний	W	–	–	–	$5,133 \cdot 10^{-4}$	$9,823 \cdot 10^{-4}$	$1,947 \cdot 10^{-3}$	$4,891 \cdot 10^{-3}$	$1,006 \cdot 10^{-2}$
	$\tilde{U}_{0,95}, \%$	–	–	–	5,28	3,44	1,95	2,55	4,25
	$P, \%$	–	–	–	-2,72	1,67	2,44	1,69	-1,59
Дво- частотний	W	$9,757 \cdot 10^{-6}$	$5,031 \cdot 10^{-5}$	$1,008 \cdot 10^{-4}$	$4,955 \cdot 10^{-4}$	$9,897 \cdot 10^{-4}$	$2,014 \cdot 10^{-3}$	$4,928 \cdot 10^{-3}$	$9,509 \cdot 10^{-3}$
	$\tilde{U}_{0,95}, \%$	10,39	1,96	1,03	0,23	0,12	0,20	0,19	0,20
	$P, \%$	2,43	-0,63	-0,77	0,84	0,93	-0,89	0,94	3,96
Дво- частотний спрощений	W	$9,757 \cdot 10^{-6}$	$5,031 \cdot 10^{-5}$	$1,007 \cdot 10^{-4}$	$4,954 \cdot 10^{-4}$	$9,890 \cdot 10^{-4}$	$2,011 \cdot 10^{-3}$	$4,911 \cdot 10^{-3}$	$9,444 \cdot 10^{-3}$
	$\tilde{U}_{0,95}, \%$	10,39	1,96	1,03	0,23	0,12	0,20	0,19	0,20
	$P, \%$	2,43	-0,63	-0,76	0,88	1,01	-0,74	1,29	4,62

Аналіз даних результатів показав, що для всіх розроблених багаточастотних методів величини відносної розширеної невизначеності вимірювання вологості не перевищують 5,28 % за виключенням величини вологості 10^{-5}

(10 мл/м³) для ДВЧ вологоміра. Цей факт свідчить про експериментальне підтвердження результатів теоретичних досліджень.

Отримані завищені значення величини відносної розширеної невизначеності для величини вологості 10^{-5} (10 мл/м³) для ДВЧ вологоміра у 10,39 % пояснюються виключно недостатньою стабільністю частоти опорного генератора частотоміра типу ЧЗ – 34, що був використаний у дослідженнях.

В результаті аналізу було встановлено, що зменшення нестабільності частоти опорного генератора частотоміра типу ЧЗ – 34 до величини не більше $5 \cdot 10^{-11}$ призведе до зменшення відносної розширеної невизначеності визначення вологості $\tilde{U}_{0,95}(W)$ з 10,39% до 3,82% для двочастотного методу та до 3,53 % для спрощеного двочастотного методу для вологості 10^{-5} (10 мл/м³).

Отримані у четвертому розділі експериментальні результати практично підтвердили досягнення мети роботи.

У додатках наведені акти впровадження та список публікацій здобувача.

ВИСНОВКИ

В дисертації вирішене важливе науково-практичне завдання по подальшому розвитку та удосконаленню резонансного дієлькометричного методу вимірювання вологості неполярних рідких діелектриків. Розроблені та реалізовані нові багаточастотні різновиди резонансного дієлькометричного методу вимірювання вологості емульсій типу “рідкий неполярний діелектрик – вода” з підвищенням його чутливості до рівня 10^{-5} (10 мл/м³) та одночасною мінімізацією впливу “сортової невизначеності” на результати вимірювання.

1. Проведено аналіз існуючих методів та засобів реалізації дієлькометричного методу взагалі та резонансного його різновиду для вимірювання вологості неполярних рідких діелектриків, визначено їх недоліки та можливості застосування у роботі. Виявлено: необхідність врахування паразитних параметрів ВГ та ВП та необхідність розробки нових багаточастотних різновидів резонансного дієлькометричного методу з мінімізацією “сортової невизначеності”, що базуються на факторах зміни стану ВП та емульсії; недостатній технічний рівень кращих світових зразків серійних вологомірів та необхідність розробки нових вологомірів СЧ та ДВЧ діапазонів відповідно до мети досліджень.

2. Запропонована та досліджена спрощена математична модель емульсії на основі моделі штучного діелектрика Кока з представленням крапель води у вигляді ідеально провідних сфер малого діаметра, що враховує недоліки відомих математичних моделей емульсії. Визначені: області застосування обраної моделі емульсії: по частоті від нуля до 2 МГц та 100 МГц – 1 ГГц; по величині вологості від 10^{-5} (10 мл/м³) до 10^{-2} (10 л/м³); величини її відносних систематичних похибок – приблизно квадрат величини вимірюваної вологості для обох діапазонів та додаткова похибка у $-2,55 \cdot 10^{-2}$ від величини вимірюваної вологості для другого діапазону.

3. Запропоновані, розроблені та теоретично обґрунтовані нові багаточастотні варіанти реалізації резонансного дієлькометричного методу для мінімізації впливу “сортової невизначеності”: узагальнений чотиричастотний метод з

урахуванням паразитних ємностей ВГ та ВП та його спрощений тричастотний варіант з урахуванням паразитної ємності ВГ для низькочастотного діапазону; двочастотний метод та його спрощений варіант для випадку, коли паразитна ємність ВП дорівнює нулю, а паразитні параметри ВГ наближаються до нуля для високочастотного діапазону.

Визначені області застосування розроблених багаточастотних методів. Доведено, що за величинами відносних систематичних похибок, які не перевищують 5 %, тричастотний метод може бути застосований замість чотиричастотного за умови, що частка m паразитної ємності ВП (в долях від його робочої ємності) не перевищує величину 0,0602. Визначено, що систематичні похибки застосування спрощеного двочастотного методу замість двочастотного не перевищують квадрата величини вимірюваної вологості. Шляхом аналізу впливу діелектричних втрат у рідкому неполярному діелектрику та емульсії, визначено, що у діапазоні вологості $10^{-5} - 10^{-2}$ ($10 \text{ мл/м}^3 - 10^4 \text{ мл/м}^3$) величини відносних похибок вимірювання вологості, що обумовлені впливом діелектричних втрат в емульсії та рідкому неполярному діелектрику не перевищують $1,07 \cdot 10^{-4}$ та $0,877 \cdot 10^{-4}$ для частот 0,1 МГц та 100 МГц відповідно. Визначено, що найбільший вплив на точність вимірювань вологості мають різниці температур рідкого діелектрика, емульсії і конструктивних елементів ВП та кількість розчиненого повітря в діелектрику та емульсії.

Визначені вимоги до засобів реалізації найбільш чутливого запропонованого багаточастотного різновиду резонансного діелькометричного методу та напрямків його реалізації для забезпечення мінімальної величини відносної похибки вимірювання вологості: частота генерації ВГ в області частот застосування математичної моделі емульсії має бути в діапазоні 100 МГц – 1 ГГц; ВП розподіленого типу має мати мінімальна геометричну довжину та максимальне рознесення першої та другої частот його резонансного спектру.

4. Запропоновано новий тип ємнісного розподіленого ВП – СНКР, теоретично визначені його характеристики у вигляді основної метрологічної характеристики (залежності величини резонансної частоти від діелектричної проникності міжелектродного середовища) та добротності. Проведено порівняльний аналіз основних характеристик СНКР з аналогічними характеристиками відомих ВП розподіленого типу: класичного чвертьхвильового резонатора та чвертьхвильового резонатора зі спіральним внутрішнім провідником. Визначено, що за однакових значень першої резонансної частоти геометрична довжина СНКР як мінімум у 3,41 рази менше, а відносний рознос першої та другої резонансної частоти як мінімум у 2,12 рази більше, що свідчить про суттєві переваги СНКР. Визначено, що, за однакових умов, по величині добротності СНКР перевершує дані відомі резонатори у 2,8 та 2,12 – 5,73 рази відповідно.

5. Проведені експериментальні дослідження СНКР шляхом вимірювання його амплітудно-частотних характеристик та визначення по результатам їх розшифровки величини добротності СНКР. Підтверджені експериментальним шляхом результати теоретичних досліджень СНКР. Підтверджено сукупністю результатів теоретичних та експериментальних досліджень СНКР правильний

вибір його у якості ВП розподіленого типу для вимірювання вологості неполярних рідких діелектриків.

6. Розроблені та створені діючі вологоміри СЧ та ДВЧ діапазонів для реалізації запропонованих багаточастотних різновидів резонансного діелькометричного методу з мінімізацією впливу “сорової невизначеності”. Розроблено та створено для ДВЧ вологоміра новий ВП розподіленого типу у вигляді СНКР.

7. Розроблено методику проведення експериментальних досліджень щодо реалізації запропонованих багаточастотних різновидів резонансного діелькометричного методу за допомогою створених вологомірів СЧ та ДВЧ діапазонів. Проведено експериментальні дослідження щодо реалізації багаточастотних резонансних діелькометричних методів за допомогою створених вологомірів СЧ та ДВЧ діапазонів та порівняльний аналіз результатів теоретичних та експериментальних досліджень.

8. Проведено оцінювання точності вимірювання вологості вологомірами СЧ та ДВЧ діапазонів стандартними методами згідно ДСТУ–Н РМГ 43:2006.

9. Проведено порівняння розроблених та створених вологомірів СЧ та ДВЧ діапазонів та кращих світових зразків стандартних вологомірів по величині невизначеності вимірювання вологості: розроблені вологоміри СЧ діапазону характеризуються приблизно у 3 рази, а вологоміри ДВЧ діапазону як мінімум на один порядок меншими значеннями та у відповідне число раз більшою чутливістю.

10. Результати дисертаційної роботи впроваджені: в ДП КБ “Південне” ім. М. К. Янгеля”, м. Дніпро; в ДП “Завод ім. В. О. Малишева”, м. Харків; ТОВ науково-виробниче об’єднання “Контур”, м. Харків. Крім цього, результати дисертаційної роботи впроваджені в навчальний процес Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Коробко А. А. Электрофизическая модель эмульсии типа минеральное масло – вода инженерного типа / А. А. Коробко, В. В. Рудаков, А. И. Коробко // Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. – Харків, 2009. – № 39. – С. 170–173.

Здобувач запропонував та теоретично обґрунтував застосування нової спрощеної математичної моделі емульсії на основі моделі штучного діелектрика Кока.

2. Коробко А. А. Оптимизация параметров элементов последовательного умножителя напряжения электростатического испытательного генератора с учетом нестационарных процессов / А. А. Коробко, В. В. Рудаков, А. И. Коробко // Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. – Харків, 2010. – № 34. – С. 111-117.

Здобувач провів теоретичні дослідження нестационарних процесів у послідовному помножнику напруги.

3. Коробко А. А. Получение эмульсии типа углеводородное топливо – вода с помощью электрогидравлического эффекта / А. А. Коробко, В. В. Рудаков,

А. И. Коробко // Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. – Харків, 2011. – № 16. – С. 154-157.

Здобувач розробив електрогідравлічний метод виготовлення емульсії та провів його дослідження.

4. Коробко А. А. Повышение чувствительности измерений содержания влаги в трансформаторном масле диэлькометрическим методом в резонансном режиме / А. А. Коробко, В. В. Рудаков, // Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. – Харків, 2014. – № 50 (1092). – С. 143–149.

Здобувач розробив вологомір з підвищеною чутливістю та провів його дослідження.

5. Коробко А. А. Резонансные спектры неоднородных коаксиальных резонаторов для определения диэлектрической проницаемости жидких сред в СВЧ диапазоне / А. А. Коробко, В. В. Рудаков, // Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. – Харків, 2015. – № 20 (1129). – С. 129-137.

Здобувач провів аналіз резонансних спектрів СНКР методом імітаційного моделювання та запропонував використовувати його в якості ВП у НВЧ діапазоні.

6. Коробко А. А. Исследования метрологических характеристик измерительных преобразователей в виде ступенчатого коаксиального неоднородного резонатора для диэлькометрии жидких сред в СВЧ диапазоне/ А. А. Коробко, В. В. Рудаков // Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. – Харків, 2015. – № 51 (1160). – С. 91–95.

Здобувач провів теоретичні дослідження основних метрологічних характеристик ВП у вигляді СНКР для діелькометрії рідких середовищ у НВЧ діапазоні.

7. Коробко А. А. Высокочувствительный СВЧ измеритель влагосодержания в неполярных диэлектрических жидкостях на основе ступенчатого неоднородного коаксиального резонатора / А. А. Коробко, В. В. Рудаков // Електротехніка і електромеханіка. – 2016. – №5. – С. 51–56.

Здобувач розробив та провів експериментальні дослідження високочутливого вологоміра НВЧ діапазону на основі СНКР.

8. Коробко А. А. Влияние температуры и барометрического давления на метрологические характеристики резонансного метода диэлькометрии эмульсии типа вода – неполярный диэлектрик / А. А. Коробко, В. В. Рудаков // Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. – Харків, 2016. – № 36 (1208). – С. 70–73.

Здобувач здійснив теоретичний аналіз впливу температури, барометричного тиску та розчиненого повітря на метрологічні характеристики резонансного діелькометричного методу.

9. Коробко А. А. Анализ влияния диэлектрических потерь на метрологические характеристики диэлькометрического резонансного метода определения влагосодержания в эмульсии типа “трансформаторное масло – вода”/ А. А. Коробко, М. И. Баранов// Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. – Харків, 2017. – № 15 (1237). – С. 12–16.

Здобувач здійснив теоретичний аналіз впливу діелектричних втрат на метрологічні характеристики резонансної дієлькометрії.

10. Коробко А. А. Многочастотные алгоритмы определения влагосодержания жидких эмульсий методом резонансной диэлькометрии / А. А. Коробко // Електротехніка і електромеханіка. – 2017. – №3. – С. 40–46.

11. Коробко А. А. Основные метрологические характеристики диэлектрического метода экспериментального определения содержания воды в системе трансформаторное масло – вода / А. А. Коробко, В. В. Рудаков, А. И. Коробко // Тези доповідей XVII Міжнародної науково-практичної конференції “Інформаційні технології: наука, техніка, технології, освіта, здоров’я”. – Харків, НТУ “ХПІ”, 2009. – С. 308.

Здобувач визначив основні питомі метрологічні характеристики методу резонансної дієлькометрії для підвищення його чутливості.

12. Коробко А. А. Метод электрофизического контроля влагосодержания в углеводородной эмульсии, созданной по технологии электрогидравлического эффекта / А. А. Коробко, В. В. Рудаков // Тези доповідей XIX Міжнародної науково-практичної конференції “Інформаційні технології: наука, техніка, технології, освіта, здоров’я”. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2011. – Ч. IV. – С.101.

Здобувач запропонував та здійснив дієлькометричний метод вимірювання вологості емульсії, що отримана за допомогою електрогидравлічного ефекту.

13. Коробко О. А. Застосування дієлькометричного методу для вимірювання вологовмісту неполярних діелектриків / О. А. Коробко, В. В. Рудаков // Тези доповідей XXII Міжнародної науково-практичної конференції “Інформаційні технології: наука, техніка, технології, освіта, здоров’я”. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2014. – ч. IV. – С. 119.

Здобувач запропонував удосконалений дієлькометричний метод для вимірювання вологості рідких неполярних діелектриків.

14. Коробко А. А. Анализ основных метрологических характеристик резонансной диэлькометрии для измерения влагосодержания в неполярных жидкостях // Тези доповідей XXV Міжнародної науково-практичної конференції “Інформаційні технології: наука, техніка, технології, освіта, здоров’я”. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2017. – ч. IV. – С.139.

15. Коробко А. А. Применение диэлькометрического метода контроля электроизоляционных свойств трансформаторного масла, загрязненного электропроводящими продуктами его термического разложения в виде сажи / А. А. Коробко, А. И. Коробко // Тези доповідей XXV Міжнародної науково-практичної конференції “Інформаційні технології: наука, техніка, технології, освіта, здоров’я”. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2017. – ч. IV. – С. 141.

Здобувач запропонував та обґрунтував використання дієлькометричного методу для визначення забрудненості трансформаторного масла.

АНОТАЦІЇ

Коробко О. А. Удосконалення резонансного дієлькометричного методу контролю та визначення вологості рідких неполярних діелектриків. На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.11.13 “Прилади і методи контролю та визначення складу речовин” (15 – Автоматизація та приладобудування) – Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”.

Мета роботи: удосконалення резонансного дієлькометричного методу контролю та визначення вологості рідких неполярних діелектриків задля підвищення його чутливості до рівня 10^{-5} з одночасною мінімізацією впливу “сортової невизначеності”. Запропоновані та досліджені: спрощена математична модель емульсії на основі моделі штучного діелектрика Кока; нові багаточастотні різновиди резонансного дієлькометричного методу; новий тип розподіленого вимірювального перетворювача. Розроблено, теоретично та експериментально досліджено вологоміри середньочастотного та дуже високочастотного діапазонів. Експериментальним шляхом підтверджено досягнення мети роботи.

Ключові слова: емульсія, неполярний рідкий діелектрик, вологість, резонансний дієлькометричний метод, “сортова невизначеність”, ємнісний вимірювальний перетворювач, вимірювальний генератор, ступінчастий неоднорідний коаксіальний резонатор.

Коробко А. А. Усовершенствование резонансного диэлькометрического метода контроля и определения влажности жидких неполярных диэлектриков. На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук (доктора философии) по специальности 05.11.13 “Приборы и методы контроля и определения состава веществ” (15 – Автоматизация и приборостроение) – Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”.

Цель работы: усовершенствование резонансного диэлькометрического метода контроля и определения влажности жидких неполярных диэлектриков путем повышения его чувствительности до уровня 10^{-5} с одновременной минимизацией влияния “сортовой неопределенности”. Предложены и исследованы: упрощенная модель эмульсии на основе модели искусственного диэлектрика Кока; новые многочастотные разновидности резонансного диэлькометрического метода; новый тип распределённого ёмкостного измерительного преобразователя. Разработаны, теоретически и экспериментально исследованы влагомеры среднечастотного и очень высокочастотного диапазонов. Экспериментальным путем подтверждено достижение цели работы.

Ключевые слова: эмульсия, неполярный жидкий диэлектрик, влажность, резонансный диэлькометрический метод, “сортовая неопределенность”, ёмкостной измерительный преобразователь, измерительный генератор, ступенчатый неоднородный коаксиальный резонатор.

Korobko O. A. Improvement of resonance dielectric method of control and determination of moisture content liquid nonpolar dielectrics. Manuscript.

Thesis for a candidate degree (PhD) in specialty 05.11.13 "Instruments and methods of control and determination of substances" (15 – Automation and Instrumentation) – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute".

The thesis is devoted to the improvement of the resonant dielectric method of monitoring and determining the humidity of emulsions such as liquid non-polar dielectric - water in order to increase its sensitivity to level 10^{-5} while simultaneously minimizing the type and grade of non-polar dielectric ("varietal uncertainty") on the measurement results.

An analytical review and analysis of the existing methods and means of implementation of the dielectric method in general and its resonant variety has been carried out. The main research areas have been identified: development of a simplified emulsion model; development of new varieties of the resonant dielectric method with minimization of the effect of "varietal uncertainty" for measuring humidity at a level of 10^{-5} ; development of a new type of distributed transducer. A simplified emulsion model was chosen based on the Kok artificial dielectric model, its applications were determined by frequency, humidity, and the values of its systematic errors were determined. New multifrequency varieties of the resonant dielectric method have been developed based on the proposed mathematical model of the emulsion, taking into account the parasitic capacitances of the measuring generator and the measuring converter. Metrological characteristics of the generalized four-frequency method and its simplified three- and two-frequency varieties are obtained. The areas of applicability of multifrequency methods are analyzed and their systematic errors are determined. The most sensitive method, the two-frequency method, was determined, the effect of dielectric losses in water was analyzed for it, and the generation frequency of the measuring generator, which corresponds to its maximum sensitivity, 100 MHz, was determined.

A new type of distributed-type measuring transducer is proposed for the practical implementation of the two-frequency method — a stepwise heterogeneous coaxial resonator; its theoretical and experimental studies are carried out; its advantages in relation to the known transducers are determined.

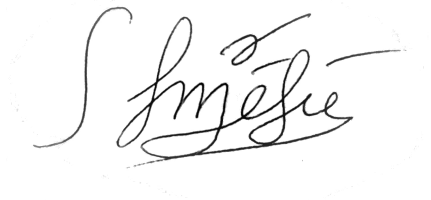
A hygrometer of the mid-frequency range based on a concentrated-type capacitive transducer and a hydrometer of a very high-frequency range based on a stepped heterogeneous coaxial resonator have been developed. The circuit solutions of the measuring transducer and the measuring generator of the hygrometer of the mid-frequency range, which provided the minimum values of their parasitic capacitances, were developed and implemented. The circuit solutions of the measuring transducer and the measuring generator of a hygrometer of a very high frequency range have been developed and implemented, which provided almost zero effect of their parasitic capacitances.

A methodology has been developed for conducting experimental research on the implementation of four- and three-frequency methods using a mid-range moisture meter and implementing a two-frequency method and a simplified version of it using a very high-frequency moisture meter.

Experimental studies on manufactured test emulsions, as well as analysis and processing of their results, were carried out. For all developed multi-frequency methods and moisture values of test emulsions in the range of $10^{-4} - 10^{-2}$, the value of the relative extended uncertainty of moisture measurement did not exceed 5.28 %. For the humidity of the test emulsion 10^{-5} , the value of this uncertainty did not exceed 10.39 % (due to the lack of stability of the frequency of the reference generator frequency Ch 3 - 34, which was used in the research).

The developed improved multi-frequency resonance dielectric methods for determining humidity have increased the sensitivity to a level of 10^{-5} while minimizing “varietal uncertainty.”

Keywords: emulsion, non-polar liquid dielectric, humidity, “varietal uncertainty”, resonant dielectric method, capacitive measuring transducer, measuring generator, stepped non-uniform coaxial resonator.

A handwritten signature in black ink, appearing to read "S. Imeje", is enclosed within a faint, circular, dashed-line border.

Підписано до друку 09.01.2019 р. Формат 60х90/16.
Папір офсетний. Друк – цифровий. Ум. друк. арк. – 0,9.
Гарнітура Times New Roman. Наклад 100 прим. Зам. №19041801

Надруковано у копії-центрі “МОДЕЛІСТ”
(ФОП Миронов М.В., свідоцтво ВО4№022953)
м. Харків, вул. Мистецтв, 3 літер Б-1 тел. 7-170-354
www.modelist.in.ua