



УКРАЇНА

(19) UA

(11) 60954

(13) C2

(51) МПК (2006)

G01N 27/02

G01N 27/06

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІОПИС
ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД

(54) СПОСІБ БЕЗКОНТАКТНОГО ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРОВІДНОСТІ ЕЛЕКТРОЛІТІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ПЕРВИННОГО ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

1

(21) 2003077005

(22) 25.07.2003

(24) 15.03.2006

(46) 15.03.2006, Бюл. № 3, 2006 р.

(72) Редько Володимир Іванович, Хандецький Володимир Сергійович, Шембель Олена Мойсейвна, Новак Петро Якович, US

(73) ДОЧІРНЄ ПІДПРИЄМСТВО З ІНОЗЕМНИМИ ІНВЕСТИЦІЯМИ "ЕНЕР- 1" ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ "ОН ПОВЕР БАТТЕРІ С.Р.Л."

(56) US 5077525, 31.12.1991

FR 2782802, 03.03.2000

US 2542057, 20.02.1951

US 4922201, 01.05.1990

US 4220920, 02.09.1980

US 6479990, 27.12.2001

SU 873093, 26.12.1979

UA 45293 A, 15.03.2002

(57) 1. Спосіб безконтактного вимірювання електричної провідності електролітів, що включає розміщення електроліту в пробовідбірнику, збудження змінного магнітного поля з використанням вихорострумового датчика, підключення до датчика конденсатора змінної ємності, налаштування контуру, що утворився, в резонанс з частотою генератора гармонійних коливань, фіксацію власних параметрів датчика на резонансній частоті, розташування пробовідбірника з електролітом на робочому торці датчика, визначення внесеного активного опору вихорострумового датчика відносно його власного індуктивного опору, який відрізняється тим, що використовують три вихорострумових датчики та здійснюють вимірювання частотної характеристики власної добротності датчика, фіксують відповідну максимуму цієї добротності першу робочу частоту, на якій здійснюють вимірювання відносного внесеного активного опору датчика із зразком електроліту, збільшують діаметр датчика в q разів, при цьому в q^2 разів зменшують першу робочу частоту, фіксують таким чином нульову робочу частоту, на якій здійснюють вимір відносного активного опору датчика із зразком електроліту, зменшують діаметр датчика відносно початкового в q разів, при цьому в q^2 разів збільшують першу робочу частоту, фіксують таким чином другу робочу частоту, на

2

якій здійснюють вимір відносного внесеного активного опору датчика із зразком електроліту, порівнюють значення відносного внесеного активного опору, одержаного на першій робочій частоті з аналогічним опором, одержаним на нульовій робочій частоті і помноженим на відношення власних індуктивностей датчиків на нульовій і першій робочих частотах та на величину $1/q$, а також з аналогічним опором, одержаним на другій робочій частоті, помноженим на відношення власних індуктивностей датчиків на другій і першій робочих частотах та і на величину q , враховують при порівнянні також поправки неповної компенсації зазору на нульовій і другій робочих частотах, причому якщо значення, що порівнюють, співпадають з точністю 10%, визначають величину питомої електричної провідності електроліту за значенням відносного внесеного активного опору на першій робочій частоті, а якщо значення, що порівнюють, відрізняються більше ніж на 10%, змінюють число витків датчика, після чого визначають нове значення першої робочої частоти і повторюють послідовність дій.

2. Спосіб за п. 1, який відрізняється тим, що величину q вибирають в діапазоні 1,3-1,8.

3. Спосіб за п. 1, який відрізняється тим, що мінімальне число витків вихорострумового датчика задають рівним двом.

4. Спосіб за одним з пп. 1-3, який відрізняється тим, що максимальне число витків вихорострумового датчика вибирають таким, що в 1,5 рази перевищує значення, яке відповідає найбільшій чутливості датчика з діелектричним сердечником.

5. Спосіб за одним з пп. 1 або 4, який відрізняється тим, що як матеріал сердечника для котушки датчика вибирають діелектрик з тангенсом кута діелектричних втрат не більше $5 \cdot 10^{-3}$ в діапазоні від найменшого значення нульової до найбільшого значення другої робочої частоти.

6. Спосіб за одним з пп. 1-4, який відрізняється тим, що мінімальний діаметр проводу намотки котушки датчика задають не менше однієї десятої від діаметра котушки, а максимальний - не більше 1,5 мм.

7. Спосіб за одним з пп. 1-6, який відрізняється тим, що діаметр проводу обмотки і крок обмотки

(13) C2

(11) 60954

(19) UA

вибирають відповідними максимальній чутливості вимірювань, при цьому власна резонансна частота вихорострумowego датчика, що визначається значеннями його індуктивності та паразитної міжвиткової ємності, повинна не менше, ніж на порядок перевищувати значення другої робочої частоти.

8. Спосіб за одним з пп. 1-7, який відрізняється тим, що кожен трійку вихорострумowych датчиків з однаковими числами витків, що працюють на нульовій, першій і другій робочих частотах, об'єднують відносно загальної осі в єдину конструкцію первинного вимірювального перетворювача, а пробовідбірник з електролітом розташовують на робочому торці перетворювача, при цьому вісь симетрії пробовідбірника повинна співпадати з загальною віссю первинного перетворювача.

9. Спосіб за одним з пп. 1-8, який відрізняється тим, що діаметр проводу намотки і крок намотки зберігають постійними для кожної трійки датчиків різних діаметрів, але з однаковими числами витків.

10. Спосіб за одним з пп. 1-9, який відрізняється тим, що відстань між найближчим до поверхні

електроліту витком кожного датчика первинного вимірювального перетворювача і поверхнею електроліту в пробовідбірнику задають пропорційною радіусу датчика.

11. Спосіб за одним з пп. 1-10, який відрізняється тим, що при розрахунках величини питомої електричної провідності електроліту на першій робочій частоті враховують коефіцієнти взаємоіндукції між усіма парними комбінаціями витків відповідного вихорострумowego датчика.

12. Спосіб за одним з пп. 1 або 5, або 8, або 10, який відрізняється тим, що пробовідбірник виготовляють з діелектричного матеріалу, тангенс кута діелектричних втрат якого не вище $1 \cdot 10^{-3}$.

13. Спосіб за одним з пп. 1 або 2, або 7, або 10, або 11, який відрізняється тим, що мінімальні радіальні розміри зразка електроліту у пробовідбірнику повинні не менше, ніж у два рази перевищувати максимальний діаметр вихорострумowego датчика з трійки датчиків первинного вимірювального перетворювача.

Винахід відноситься до електротехнічної промисловості, зокрема до галузі вимірювання електричних властивостей електролітів і стосується способу та первинного вимірювального перетворювача для вимірювання їх електричної провідності.

Електрична провідність електролітів в більшості випадків традиційно вимірюється на змінному струмі з використанням контактних засобів. При цьому на вірогідність одержаних результатів значно впливають контактні явища.

До недоліків способу вимірювання провідності електроліту з використанням контактних електродів і змінного струму слід віднести наступне.

В залежності від властивостей розчину і механізму іонної провідності змінюється ширина і положення діапазону частот змінного струму, в межах якого провідність не залежить від частоти. Суворо кажучи, для кожного випадку необхідно визначити цей діапазон частот і допустиму величину напруги змінного струму, яка прикладається до електродів. Проте це не є достатньою умовою, що гарантує достатню вірогідність вимірів. Наступною важливою умовою є постійність провідності, що визначають на протязі часу вимірювань, іноді досить довгого. Це буде означати, що на електродах в даному діапазоні частот і при даній напрузі не відбуваються реакції, що змінюють стан системи.

Уникнути похибок, що властиві контактним засобам вимірювання електричних властивостей електролітів можна, використовуючи безконтактні вихорострумові методи вимірювання.

Відомі пристрої для вимірювання електричної провідності рідинних електролітів вихорострумовим методом.

В [патенті US 2542057, Relis, "Method and apparatus for measuring the conductivity of an electrolyte", Feb. 20, 1951], провідність рідини визначається шляхом занурювання в неї ізольованих

первинної та вторинної котушок індуктивності тороїдальної форми. Первинна котушка збуджується на змінному струмі, поле цієї котушки наводить в електроліті вихоровий струм. Поле вихорового струму фіксується вторинною котушкою. Величина вихорового струму залежить від питомої електричної провідності рідинного електроліта. Використовується тонкий мідний екран, що розміщується понад котушками. Для зменшення рівня напруги, не пов'язаної з сигналом, використовується зовнішня схема компенсації.

В патенті US 3806798, Gross, "Electrodless conductivity measuring system", Apr. 23. 1974 для вимірювання провідності рідини також використовуються збуджуюча та вимірювальна котушки індуктивності. Компенсація завад та збільшення чутливості вимірювань у цьому патенті досягається за рахунок взаємного розташування котушок, екранування, введення додаткової обмотки.

В [патенті US 4220920, Gross, "Electrodless conductivity measuring system", Sept. 2. 1980], збуджуюча та вимірювальна котушки, що занурені в рідину, електрична провідність якої вимірюється по напрузі, наведеної вихоровим струмом в рідині на вимірювальній котушці, певним чином орієнтовані одна відносно другої. Підвищення метрологічних характеристик в цьому патенті досягається за рахунок особливої форми екранів котушок, розташування обмоток та схеми обробки сигналу.

Перевагами цих патентів є безконтактність вимірювань електричної провідності рідинних середовищ.

Загальним недоліком цих патентів є те, що вимірювання здійснюються на одній фіксованій частоті, не розглядаються питання, пов'язані з дисперсією питомої електричної провідності рідинних середовищ.

В [патенті US 4408202, Fales, "Electrokinetic display system", Oct. 4, 1983], пропонується система дослідження електрокінетики розчинів рідинних

електролітів з різними концентраціями. Електроліт містить реагенти, які приймають участь в оборотній реакції в процесі електролізу. Реагенти є такими, що самі індицируються, чи містять індикатор. Між електродами, зануреними у рідину пропускають електричний струм. До об'єму електроліту прикладають змінне магнітне поле, збуджують в електроліті вихорові струми, переміщують магнітне поле у просторі. Таким чином досліджують процеси в області електродів, пов'язані з рухом та накопиченням носіїв заряду в електроліті.

В [патенті US 4820990, Moore, "Electrode-less detector", Apr. 11, 1989], запропоновано використання індуктивного первинного перетворювача, розташованого на пробовідбірнику у формі діелектричного циліндра, для дослідження розташування просторового заряду (іонного облака) в приелектродній області подвійного електричного шару в гетерогенних електрохімічних рідинах. Індуктивний перетворювач збуджується на фіксованій частоті. Використовується електрична схема з сигнальним процесором для обробки сигналу в залежності від умов формування в рідині просторового заряду.

Перевагою цих патентів є те, що використання вихорового магнітного поля дозволяє зондувати розташування та рух носіїв заряду в приелектродних областях без заглиблення в ці області електроліту додаткових контактних електродів, які внесуть зміни в розташування зарядів та їх концентрацію.

Недоліком є те, що запропоновані рішення не дозволяють визначити частотні характеристики процесу переносу зарядів в електроліті.

В [патенті US 4825168, Ogava, et. al, "Remote conductivity sensor using square wave excitation", Apr. 25, 1989], запропоновано використання вихорострумowego датчика у вигляді збуджуючої та вимірювальної котушок для вимірювання провідності рідини в потоці. Використовується для контролю якості води у водопроводі. Схема сенсора включає генератор змінного струму, цифровий таймер, тригер, перетворювач струм-напруга, підсилювач змінного струму, синхронний детектор.

Перевагою цього патенту є безконтактність вимірювання, його висока чутливість за рахунок використання високих частот поля.

Але при вимірюванні провідності більш складних рідинних середовищ слід враховувати також процеси періодичного переміщення (або зміщення у просторі) зв'язаних зарядів під впливом змінного поля, що не здійснюється в даному патенті.

В [патенті US 5157332, Reese et. al, "Three-toroid electrodeless conductivity cell", October 20, 1992], запропоновано використання трикотушечної системи, що занурюється у рідину, для вимірювання її електричної провідності. Вимірювання здійснюється в потоці рідини. Використовуються дві конфігурації давача: перша, коли дві крайні тороїдальної форми котушки є збуджуючими, а середня-вимірювальна; друга, коли середня котушка є збуджуючою, а дві крайні-вимірювальними. Порівнюються результати, одержані з використанням трикотушечної і двокотушечної систем.

Перевагою цього патенту є можливість визначення неоднорідностей в об'ємі потоку рідини.

Недоліком патенту є відсутність дослідження

провідності в діапазоні частот.

В [патенті FR 2782802 Al, Coudray Pascal et. al, Mar. 03, 2000], паралельно вихорострумовому датчику підключають конденсатор, ємність якого може змінюватись. Паралельний коливальний контур, що створюється при цьому, підключають до генератора гармонійних коливань и здійснюють його налагодження в резонанс з частотою генератора. В патенті пропонується використання коливального контуру з ємнісним ланцюгом для вимірювання питомого електричного опору електропровідної рідини.

Використання паралельного резонансного контуру має переваги в області високих частот (метрових довжин хвиль), що дозволяє досліджувати високоомні рідини.

Ліє в запропонованій схемі може вимірюватись лише один параметр вихорострумowego датчика: зміна його активного опору, чи його індуктивності. Тобто при високій чутливості вимірювань, в високодобротному контурі, один із параметрів датчика повинен бути дуже малим, щоб не вносити суттєвої помилки в результаті вимірювань.

Найбільш близьким по технічній суті до пропонуемого винаходу є спосіб безконтактного виміру електричної провідності рідини по [патенту US 5077525, West et. al, "Electrodeless conductivity sensor with inflatable surface", Dec. 31, 1991].

В патенті запропоновано генерування та збудження змінного магнітного поля за допомогою котушки індуктивності тороїдальної форми, вимірювання поля вихорового струму, наведеного полем збуджуючої котушки у рідині, з використанням вимірювальної котушки такої ж форми. Внесена в вимірювальну котушку напруга залежить від інтенсивності вихорового струму в рідині, яка при фіксованій величині напруженості збуджуючого поля визначається провідністю рідини. Зовнішня поверхня перетворювача відокремлена від рідини еластичною непровідною мембраною товщиною від 2 до 3 мм. Патент включає засоби, що здійснюють вібрацію мембрани, очищуючи її таким чином від осаду, який часто є електропровідним. Такий осад вносить значну похибку в результат вимірів електричної провідності рідини.

Основними перевагами цього патенту є безконтактність вимірів та наявність засобів для самоочищення поверхні мембрани, що відокремлює робочий торець датчика від рідини.

Недоліками цього способу є відсутність засобів для вимірювання частотної залежності провідності електроліту, а також те, що еластична мембрана створює складну конфігурацію поверхні рідини відносно робочого торця датчика. У зв'язку з цим тут можливий лише орієнтовний розрахунок питомої електричної провідності рідини. Цей патент може бути ефективно використано для порівняння відносних значень електричної провідності електролітів, що мають приблизно однакову щільність.

В основу винаходу поставлена задача одержання вірогідних результатів вимірів питомої електричної провідності рідинних електролітів.

Поставлена задача досягається тим, що в способі та первинному вимірювальному перетворювачі для безконтактного вимірювання електрич-

ної провідності рідинних електролітів, що включає розміщення проби електроліту в пробовідбірнику у вигляді діелектричного стакану, збудження змінного магнітного поля з використанням вісесиметричного вихорострумowego датчика, підключення до датчика конденсатора змінної ємності, настроювання контуру, що утворився, в резонанс з частотою генератора гармонійних коливань, фіксацію власних параметрів датчика на резонансній частоті, розташування діелектричного стакану з електролітом на робочому торці вихорострумowego датчика на одній вісі з ним, обчислення складових внесеного імпеданса датчика, відповідно до винаходу, реєструють змінення внесеного активного опору параметричного вихорострумowego датчика, нормоване до його власного індуктивного опору, при зміні геометрії системи вихорострумовой датчик - пробовідбірник, числа витків датчика і частоти його магнітного поля, шляхом порівняння скоректованих значень внесених опорів визначають діапазон частот, в якому провідність електроліту не залежить від частоти, обчислюють величину питомої електропровідності.

Здійснюють вимірювання частотної характеристики власної добротності датчика і фіксують відповідну максимуму цієї добротності першу робочу частоту, на якій здійснюють вимірювання відносно го активного внесеного опору датчика зі зразком.

Після виміру на першій робочій частоті збільшують діаметр датчика в q раз, при цьому в q^2 разів зменшують першу робочу частоту, фіксуючи таким чином нульову робочу частоту, на якій здійснюють вимір внесеного опору датчика зі зразком.

Після вимірів на першій і нульовій робочих частотах зменшують діаметр датчика відносно початкового в q разів, при цьому в q^2 разів збільшують першу робочу частоту, фіксуючи таким чином другу робочу частоту, на якій здійснюють вимір внесеного опору датчика зі зразком.

Порівнюють значення активного внесеного опору, нормованого до власного реактивного опору датчика на першій робочій частоті з аналогічним опором на нульовій робочій частоті, помноженим на відношення власних індуктивностей датчиків на нульовій і першій робочих частотах і на величину $1/q$, а також з аналогічним опором на другій робочій частоті, помноженим на відношення власних індуктивностей датчиків на другій і першій робочих частотах і на величину q , враховуючи також поправки неповної компенсації зазору на нульовій та другій робочих частотах. Якщо значення, які порівнюють співпадають з точністю 10%, визначають величину питомої електричної провідності електроліту по значенню відносного активного внесеного опору на першій робочій частоті. Величину q обирають в діапазоні 1,3-1,8.

Якщо скореговані значення відносних внесених опорів, виміряні на нульовій, і другій робочих частотах, а також значення внесеного опору на першій робочій частоті відрізняються більше, ніж на 10%, змінюють число витків котушки вихорострумowego датчика, після чого визначають нове значення першої робочої частоти і знову виконують дії відповідно вищезазначеному.

Мінімальне число витків вихорострумowego датчика дорівнює двом. Максимальне число витків

вихорострумowego датчика в 1,5 рази перевищує значення, що відповідає найбільшій чутливості датчика з діелектричною сердечником.

В якості матеріалу сердечника для котушки датчика може бути використаний діелектрик з тангенсом кута діелектричних втрат не більше $5 \cdot 10^{-3}$ в діапазоні від найменшого значення нульової до найбільшого значення другої робочої частоти.

Мінімальний діаметр дроту намотки котушки датчика задають не менше однієї десятої від діаметра котушки, але не більше 1,5 мм. Діаметр дроту намотки і крок намотки обирають відповідними максимальній чутливості, при цьому власна резонансна частота вихорострумowego датчика, що визначається значеннями його індуктивності та паразитної міжвиткової ємності повинна не менше, чим на порядок перевищувати значення другої робочої частоти. Діаметр дроту намотки і крок намотки зберігають постійними для кожної трійки датчиків різних діаметрів, але з однаковими числами витків.

Кожну трійку вихорострумowych датчиків з однаковими числами витків, що працюють на нульовій, першій і другій робочих частотах об'єднують відносно загальної вісі в єдину конструкцію первинного вимірювального перетворювача, а пробовідбірник з електролітом розташовують на робочому торці перетворювача, при цьому вісь симетрії пробовідбірника повинна співпадати з загальною віссю первинного перетворювача. Відстань між найближчим до поверхні електроліта витком кожного датчика первинного вимірювального перетворювача і поверхнею електроліта в пробовідбірнику задається пропорційною радіусу датчика.

При розрахунках величини питомої електричної провідності електроліту на першій робочій частоті враховують коефіцієнти взаємодукції між усіма парними комбінаціями витків відповідного вихорострумowego датчика.

Пробовідбірник виготовляють з діелектричного матеріалу, тангенс кута діелектричних втрат якого не вище 10^{-3} . Товщину шару електроліту в пробовідбірнику задають таку, що не менше, ніж в 1,5 рази перевищує радіус вихорострумowego датчика, який працює на нульовій робочій частоті, а діаметр стакану пробовідбірника не менше, чим у два рази перевищує діаметр цього датчика.

Запропонований спосіб в порівнянні з прототипом дозволяє отримати достовірні результати вимірювань значень питомої електропровідності рідинних електролітів, в тому числі і з різною щільністю, при використанні безконтактного вихорострумowego датчика, змінюючи його діаметр, кількість витків і частоту вихорового магнітного поля, порівнюючи внесений в датчик відносний активний опір, отриманий на різних частотах, здійснюючи обчислення питомої електропровідності.

Проведений заявником пошук по джерелах науково-технічної і патентної інформації і вибраний із переліку аналогів прототип дозволив виявити вищезазначені признаки, що відрізняють описане технічне рішення.

Таким чином, запропонований "спосіб та первинний вимірювальний перетворювач для безконтактного вимірювання електричної провідності рідинних електролітів" задовольняє критерію ви-

находу "новизна". Проведений заявником додатковий пошук відомих технічних рішень з метою виявлення у них ознак, подібних ознакам відрізняючої частини формули винаходу показав, що такі ознаки не виявлені. Отже, спосіб задовольняє наступному критерію винаходу "технічний рівень".

Суть рекомендованого способу пояснюється графіками, приведеними на фіг.1-6

Фіг.1. Залежність нормованої величини вектор - потенціалу магнітного поля витка А в вільному просторі від відношення ρ/R_1 при $z/R_1=0$. Тут R_1 - радіус витка; ρ , z - координати циліндричної системи координат.

Фіг.2. Залежність нормованої величини вектор - потенціалу магнітного поля А витка у вільному просторі від відношення z/R_1 при $\rho=R_1$. Тут R_1 - радіус витка, ρ , z - циліндричні координати

Фіг.3. Експериментальна частотна характеристика власної добротності вихорострумowego датчика.

Фіг.4. Залежність складових комплексної діелектричної проникності від частоти для одного часу релаксації.

Фіг.5. Первинний вимірювальний перетворювач:

1 - діелектричний стакан; 2 - рідинний електрод; 3 - вихорострумний датчик, що працює на нульовій робочій частоті; 4 - на першій робочій частоті; 5 - на другій робочій частоті.

Фіг.6. Залежність питомої електричної провідності σ рідинного електроліту $PK+LiClO_4$ від концентрації солі.

Спосіб полягає в наступному

Вимірювання провідності рідинного електроліту у вихоровому магнітному полі з використанням накладного вихорострумowego датчика здійснюють без контакту з досліджуваною речовиною і, таким чином, відносять до класу безконтактних вимірів.

Тонкостінний стакан з твердого діелектричного матеріалу устанолюють на накладний вихорострумний датчик у вигляді короткої циліндричної котушки індуктивності з числом витків W . Стакан розташовують таким чином, щоб його вісь симетрії і вісь симетрії вихорострумowego датчика збігалися. При цьому діаметр стакану повинен бути не менш, ніж у два рази більше діаметра D датчика; тоді мінімальна відстань від витка на робочому торці датчика до бічної крайки стакану буде не менша радіуса датчика.

Вектор - потенціал магнітного поля витка з гармонійно змінним струмом, розташованого у вільному просторі, у випадку, коли центр циліндричної системи координат розміщується у центрі витка, можна представити у вигляді [1]:

$$a = \frac{\mu_0 I R_1}{2} \int_0^{\infty} J_1(\lambda R_1) J_1(\lambda \rho) e^{-\lambda |z|} d\lambda, \quad (1)$$

де $I = I e^{i\omega t}$ - струм у витку; R_1 - радіус витка; μ_0 - магнітна постійна; J_1 - функція Бесселя першого порядку, λ - параметр перетворення; ρ , z - координати циліндричної системи координат. Інтеграл у (1) виражається через повні еліптичні інтеграли першого E і другого K роду, таблиці яких містяться в ряді математичних довідників, включаючи [2]:

$$A = \frac{\mu_0 I}{\pi k} \sqrt{\frac{R_1}{\rho}} \left[\left(1 - \frac{k^2}{2} \right) K(k) - E(k) \right] \quad (2)$$

$$\text{де } k^2 = \frac{4R_1\rho}{(R^2 + \rho)^2 + z^2}$$

Напруженість електричного поля спрямована уздовж координати ϕ і пропорційна вектор - потенціалу магнітного поля А. Е.р.с., що наводиться магнітним полем витка в будь-якому співвісному з ним контурі і рівна циркуляції вектора Е по цьому контуру, також пропорційна вектор - потенціалу. Таким чином величина А є зручною характеристикою поля витка. На фіг.1 проведена розрахована по формулі (2) залежність величини $|A|/P$, де $P = \mu_0 I / \pi = \text{const}$, у вільному просторі (вакуумі) від відношення ρ/R_1 у площині витка, тобто при $z=0$. З цього графіка випливає, що вектор - потенціал магнітного поля А максимальний при відстані $\rho=R_1$, від центру витка, а на відстані $\rho=2R_1$ його величина вже складає приблизно 10% від максимальної, (при розрахунках прийнято що в крапці $\rho=R_1$ $\alpha = \arcsin k = 89^\circ$ замість 90°). При цьому якщо мінімальна відстань від витка на робочому торці датчика ($\rho=R_1$) до бічної кромки стакану, як задавалося вище, складає не менше радіуса датчика ($\rho \geq 2R_1$), то полем за межами стакану можна знехтувати, враховуючи також те, що в провідному середовищі поле затухає швидше вздовж координати ρ , ніж в вакуумі.

Залежність $|A|/P$ від відношення z/R_1 показана на фіг.2. Тут при $z/R_1=1$ величина вектор - потенціалу зменшується приблизно в 10 разів від максимальної величини. Якщо товщина шару рідинного електроліту в стакані перевищує радіус датчика, приблизно у 1,5 рази, то з задовільною для практичних вимірювань точністю цей шар може сприйматися як напівпростір.

Паралельно вихорострумному датчику підключають конденсатор, ємність якого може змінюватися. Утворений при цьому паралельний коливальний контур підключають до генератора гармонійних коливань і настраюють у резонанс із його частотою.

На резонансній частоті проводять вимір добротності Q_0 і ємності C_0 ненавантаженого датчика, тобто датчика без зразка, потім на датчик устанолюють діелектричний стакан з рідинним електролітом, підстроюють ємність коливального контуру так, щоб ввести його знову в режим резонансу, фіксуючи резонансні значення Q_1 і C_1 . Величину внесеного в датчик активного опору R_v , нормованого до власного індуктивного опору датчика $X = \omega L_0$ визначають за формулою:

$$\frac{R_v}{\omega L_0} = \frac{Q_0 C_0 - Q_1 C_1}{Q_0 Q_1 C_1} \quad (3)$$

Власна добротність вихорострумowego датчика, як і будь-якої котушки індуктивності, залежить від частоти. Добротність котушки індуктивності дорівнює $Q = \omega L_0 / r$, де ωL_0 - це її індуктивний, а r - активний опір. Зі збільшенням частоти збільшується індуктивний опір і добротність росте. Однак по

мірі зростання частоти струм, що протікає у провіді (обмотці) котушки усе більше витісняється в поверхневі шари проводу (скин-ефект) і активний опір r збільшується. Починаючи з деякої частоти, збільшення r у знаменнику починає превалювати над збільшенням ωL_0 у чисельнику і тоді добротність з ростом частоти починає зменшуватися. Знімаючи частотну характеристику власної добротності вихорострумного датчика, визначають частоту, яка відповідає максимуму добротності. На цій частоті чутливість датчика максимальна. Тому її вибирають як першу робочу частоту, на якій здійснюють вимірювання відносного внесеного опору датчика зі зразком.

Експериментальна частотна характеристика власної добротності вихорострумного датчика показана на фіг.3.

Після виміру відносного активного опору $R_v/\omega L_0$, внесеного у вихорострумний датчик взірцем рідинного електроліту, проведеного на першій робочій частоті, збільшують діаметр датчика в q раз. Відповідно до теорії накладних параметричних датчиків] величина $R_v/\omega L_0$ виражається у вигляді:

$$\frac{R_v}{\omega L_0} = \frac{\sqrt{2\pi}}{L_0} \mu_0 R_1 W^2 \beta F(\alpha, \beta) \quad (4)$$

де R_1 - радіус датчика; L_0 - власна індуктивність датчика радіуса R_1 ; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м - магнітна постійна; W - число витків датчика; $\alpha = 2h/R_1$ (h - відстань від робочого торця датчика до поверхні середовища); $\beta = R_1 \sqrt{\omega \sigma \mu_0}$ (ω - частота, σ - питома електрична провідність досліджуемого середовища). Вираз (4) припускає, що середовище заповнює верхній півпростір (над датчиком). Функція F має складний характер і представляється у виді інтегралу, що не виражається через відомі функції. Значення цього інтегралу знаходять числовими методами або за допомогою наближених виразів[3].

Так як стакан з рідинним електролітом устано-влюють безпосередньо на робочий торець датчика, то товщина дна стакану виступає як відстань h від торця до поверхні середовища.

На змінювання величини $R_v/\omega L_0$ буде впливати тільки зміна величини β , тому що інші параметри у формулі (4) постійні.

Збільшуючи радіус датчика в q раз і одночасно зменшуючи першу робочу частоту в q^2 раз (фіксуючи при цьому нульову робочу частоту), ми одержимо те ж саме значення узагальненого параметра β (параметра Ценнека).

При порівнянні $R_{v1}/\omega_1 L_0^{(1)}$, отриманого на першій робочій частоті зі значенням

$$\frac{R_{v0}}{\omega_0 L_0^{(0)}} \cdot \frac{L_0^{(0)}}{L_0^{(1)}} \cdot \frac{1}{q} \cdot p(\alpha_0) = \frac{R_{v0}}{\omega_0 L_0^{(1)}} \cdot \frac{1}{q} \cdot p(\alpha_0),$$

(де $L_0^{(1)} = L_0$, $p(\alpha_0)$ - поправка неповної компенсації зазору на нульовій частоті), отриманого на нульовій робочій частоті досягається їх рівність, якщо тільки електропровідність електроліту не залежить від частоти в діапазоні $\omega_0 - \omega_1$.

Після вимірів на першій і нульовій робочих частотах зменшують діаметр датчика відносно поча-

ткового в q разів, відповідно в q^2 разів збільшуючи частоту і фіксуючи таким чином другу робочу частоту ω_2 , на якій здійснюють вимір внесеного опору датчика зі взірцем. При порівнянні $R_{v1}/\omega_1 L_0$, одержаного на першій робочій частоті зі значенням $p(\alpha_2) q R_{v2}/\omega_2 L_0$, одержаним на другій робочій частоті ми одержимо їх рівність при постійній електропровідності в діапазоні частот $\omega_1 - \omega_2$.

Таким чином порівнюють значення $R_{v1}/\omega_1 L_0^{(1)}$, одержаного на першій робочій частоті зі значенням $R_{v0}/\omega_0 L_0^{(0)}$, одержаним на нульовій робочій частоті, множенням на $p(\alpha_0) L_0^{(0)}/q L_0^{(1)}$; а також зі значенням $R_{v2}/\omega_2 L_0^{(2)}$, одержаним на другій робочій частоті, множенням на $q p(\alpha_2) L_0^{(2)}/L_0^{(1)}$. У випадку їх рівності:

$$\frac{R_{v0}}{\omega_0 L_0^{(0)}} \cdot \frac{L_0^{(0)}}{L_0^{(1)}} \cdot \frac{1}{q} \cdot p(\alpha_0) = \frac{R_{v1}}{\omega_1 L_0^{(1)}} = \frac{R_{v2}}{\omega_2 L_0^{(2)}} \cdot \frac{L_0^{(2)}}{L_0^{(1)}} \cdot q \cdot p(\alpha_2) \quad (5)$$

де ω_0 , ω_1 , ω_2 - відповідно нульова, перша і друга робочі частоти; $L_0^{(0)}$, $L_0^{(1)}$, $L_0^{(2)}$ - відповідно власні індуктивності датчиків, працюючих на цих частотах; електрична провідність електроліту не залежить від частоти в діапазоні від ω_0 до ω_2 .

Якщо рівняння (5) виконується, тобто електрична провідність електроліту є постійною, не залежить від частоти в діапазоні від ω_0 до ω_2 , то по значенню відносного активного внесеного опору на першій робочій частоті ($\omega_0 < \omega_1 < \omega_2$), в точці максимуму власної добротності датчика, тобто з максимальною чутливістю визначають питому електричну провідність електроліту.

З практичної точки зору, враховуючи діапазон частот, де здійснюють виміри електричної провідності електролітів, число витків і радіальні розміри вихорострумних датчиків для збереження високої чутливості вимірів, величину q пропонуємо обирати в діапазоні $q=1,3-1,8$.

Рідинний електроліт, так само як і твердий, містить два основних типи зарядів: вільні і зв'язані. Відповідно до цього дві складові має й електрична провідність електроліту.

Перша з них, обумовлена рухом вільних носіїв заряду, визначається формулою:

$$\sigma_0 = F \eta \phi (U_+^0 + U_-^0), \quad (6)$$

де F - число Фарадея ($F = qN^1$; де q - заряд, що несе кожен з іонів; N^1 - число молекул у грам-еквіваленті); $\eta = n_0/N^1$ (n_0 - число молекул розчиненої речовини в одиниці об'єму); ϕ - коефіцієнт дисоціації; $U_+^0 + U_-^0$ - сума рухомостей позитивного і негативного заряджених іонів.

Ця провідність σ_0 , що зумовлена спрямованим переміщенням іонів під дією електричного поля, називається електролітичною провідністю і не залежить від частоти (принаймні до частот дециметрового діапазону). Вона - то і підлягає визначенню.

Наявність зв'язаних зарядів обумовлено поляризацією речовини. Полярні молекули мають навіть під час відсутності електричного поля постійний дипольний момент. При накладенні зовнішнього поля вони прагнуть повернутися так, щоб розташуватися уздовж ліній напруженості. Крім того на диполь діє ще сила, пропорційна моменту диполя і градієнту напруженості поля. Ця

сила зміщує диполь в область більшої напруженості поля [4.5]. Так як в нашому випадку контур з найбільшою напруженістю електричного поля утвориться безпосередньо під витком вихорострумowego датчика, то зв'язані заряди будуть втягуватися в цю область.

Якщо спочатку молекула немає дипольного моменту (неполярна молекула), то під впливом зовнішнього електричного поля заряди в ній зміщуються, і в неї з'являється дипольний момент. У випадку нежорстких полярних молекул сумарний дипольний момент буде змінюватись з двох причин: завдяки збільшенню дипольних моментів і завдяки їхньому переміщенню в неоднорідному полі.

З урахуванням наявності в середовищі як неполярних (модель Клаузіуса-Мосоти) так і полярних молекул (модель Дебая) вектор поляризації можна представити у вигляді [4]:

$$P = \alpha n_0 E_1 + n_0 \frac{P_0^2 E_1}{3kT}, \quad (7)$$

де α - коефіцієнт поляризації молекули, n_0 - число молекул в одиниці об'єму, P_0 - власний дипольний момент молекули, k - постійна Больцмана, T - абсолютна температура, E_1 - середнє значення напруженості електричного поля, що діє на молекулу.

У формулі (7) перший доданок представляє так звану пружну, а другий - релаксаційну поляризацію.

Математичний опис релаксаційної поляризації вперше дане Дебаєм [6]. Відповідно до його теорії, діелектричну проникність можна представити у вигляді

$$\varepsilon(j\omega) = \varepsilon'_\infty + \sum_{i=1} \frac{\Delta\varepsilon_i}{1 + j\omega\tau_i}, \quad (8)$$

де ε'_∞ - проникність, що відповідає пружній поляризації (при оптичних частотах); $\Delta\varepsilon = \varepsilon_{\omega 0} - \varepsilon_\infty$; $\varepsilon_{\omega 0}$ - квазістатичне значення проникності; τ - час релаксації.

Опис $\varepsilon(j\omega)$ згідно (8) справедливий при дискретному розподілі часів релаксації. При неперервній зміні часів релаксації вводиться відповідна функція, що описує цю зміну і сума в (8) замінюється інтегралом.

Загальна щільність струму в матеріалі, що містить як вільні так і зв'язані заряди, являє собою суму щільності струму провідності і щільності струму зміщення. З урахуванням двох складових вектора поляризації (7) вираз для загальної щільності струму може бути представлений у вигляді

$$J = J_\sigma + J_\varepsilon + J_p = \sigma_0 E + j\omega \varepsilon_0 \varepsilon'_\infty E + j\omega \varepsilon_0 \sum_{i=1} \frac{\Delta\varepsilon_i}{1 + j\omega\tau_i}, \quad (9)$$

Тут перший доданок відповідає щільності струму провідності, другий - щільності ємнісного струму, а третій - щільності поляризаційного струму.

Як видно з (9), струм провідності збігається по фазі з напруженістю поля, а ємнісний струм випереджає напруженість E на 90° . Через утрати, що

обумовлені тертям поляризуємих молекул, поляризаційний струм випереджає напруженість поля на кут менший 90° , тобто його можна розділити на дві складові, що відповідно збігаються по фазі зі струмом провідності і ємнісним струмом. У зв'язку з цим у практичних розрахунках становить інтерес не кожна окремо з трьох зазначених складових щільності загального струму, а загальна щільність активної і загальна щільність реактивної складових. У цьому випадку доцільно ввести поняття комплексної питомої провідності σ і комплексної діелектричної проникності ε .

Шляхом поділу в (9) дійсної і уявної складових одержимо:

$$\sigma = \sigma' + j\sigma'' \left[\sigma_0 + \omega \varepsilon_0 \sum_{i=1} \frac{\omega \tau_i \Delta\varepsilon_i}{1 + (\omega \tau_i)^2} \right] + j\omega \varepsilon_0 \left[\varepsilon'_\infty + \sum_{i=1} \frac{\Delta\varepsilon_i}{1 + (\omega \tau_i)^2} \right], \quad (10)$$

Зв'язок між складовими комплексних значень питомої провідності визначається як

$$\sigma' = \sigma_0 + \omega \varepsilon_0 \varepsilon'' : \sigma'' = \omega \varepsilon_0 \varepsilon', \quad (11)$$

Дійсна діелектрична проникність ε' (що звичайно називається просто діелектричною проникністю і позначається ϵ) характеризує щільність заряду на пластинах конденсатора і, відповідно, здатність матеріалу збільшувати ємність конденсатора. Уявна складова ε'' чи коефіцієнт втрат характеризує для заданої частоти втрати енергії поля в матеріалі, обумовлені тертям поляризуємих молекул чи їх конгломератів.

Як впливає з виразу (11) дійсна частина провідності σ' (надалі ми будемо називати її просто загальною провідністю) складається з незалежної від частоти частини σ_0 , обумовленої рухом вільних носіїв заряду, і залежної від частоти частини σ_f :

$$\sigma' = \sigma = \sigma_0 + \sigma_f \quad (12)$$

В електролітах σ_0 обумовлена рухом іонів і визначається виразом (6).

Величина частотно залежної провідності відповідно до (10) дорівнює:

$$\sigma_f = \omega \varepsilon_0 \sum_{i=1} \frac{\omega \tau_i \Delta\varepsilon_i}{1 + (\omega \tau_i)^2}, \quad (13)$$

Слід зазначити, що порівняно невелике число матеріалів має один час релаксації τ . Характерним прикладом тут є лід з дистильованої води при значних негативних температурах. Частотні залежності для таких матеріалів мають вид, показаний на фіг.4. Однак, для більшості серед дисперсійна область виявляється розмитою. У полярних молекулярних системах має місце набір чи спектр часів релаксації, що викликає розширення дисперсної області.

Таким чином, характер частотної залежності σ_f , викликаної зміщенням зв'язаних зарядів в електролітах і трансформація частотної залежності при збільшенні концентрації солі в електроліті носить складний характер, що практично неможливо визначити теоретично.

Якщо результати порівняння скоректованих внесених опорів вихорострумowych датчиків виміряних на нульовій, першій і другій робочій частоті

не збігаються, тобто якщо рівність (5) в межах 10% похибки не виконується, то це означає, що електропровідність σ' (12) електроліту містить залежну від частоти складову σ_r , що обумовлено екстремумом частотної залежності ϵ'' .

Якщо скореговані значення відносних внесених активних опорів, виміряні на нульовій і другій робочих частотах, а також значення відносного внесеного активного опору, виміряне на першій робочій частоті відрізняються більше, ніж на 10%, змінюють число витків котушки вихорострумowego датчика, після чого визначають нове значення першої робочої частоти і знову виконують дії по збільшенню і зменшенню діаметра датчиків і проведенню з їх допомогою відповідних вимірювань. Результатам цих дій є зміщення частотного діапазону, в якому здійснюється дослідження електропровідності як в область більш низьких, так і в область більш високих частот. Таким чином здійснюється пошук частотної області за межами екстремуму ϵ'' , тобто там, де провідність електроліту σ визначається тільки складовою σ_0 (12), обумовленою рухом вільних носіїв заряду.

Враховуючи довжину провідників, що підводять електричний струм високої частоти до вихорострумowego датчика, доцільно, для збереження високої чутливості вимірювань, обмежити мінімальне число витків датчика двома.

Як було встановлено в процесі експериментів при змінюванні числа витків короткої циліндричної котушки її чутливість по активному внесеному опору змінюється. Ця чутливість має максимум, який в залежності від діаметру котушки, товщини провіднику обмотки, відстані між витками в високочастотному діапазоні дорівнює $W=4-5$. Для збереження чутливості вимірювань доцільно, щоб максимальне число витків вихорострумowego датчика перевищувало значення, що відповідає найбільшій чутливості не більше як 1,5 рази.

Використання магнітодіелектричного матеріалу, наприклад ферриту, в якості матеріалу сердечника котушки вихорострумowego датчика при роботі в діапазоні метрових довжин хвиль обмежується двома факторами: по-перше магнітна проникність μ ферриту в означеному частотному діапазоні незначна, а по друге - вона залежить від частоти. Тому в якості сердечника котушки вихорострумowego датчика доцільно використовувати діелектрик, при цьому, щоб наявність такого сердечника не впливала на чутливість вимірів, тангенс кута діелектричних втрат діелектрика повинен бути не більше 10^{-3} в діапазоні від найменшого значення нульової до найбільшого значення другої робочої частоти.

Діаметр проводу обмотки котушки датчика в значній мірі впливає на його активний опір на усіх частотах, в тому числі і на високих частотах, де струм протікає у тонкому поверхневому шарі проводу. Збільшення власного активного опору котушки зменшує добротність датчика. Тому мінімальний діаметр проводу задають не менше однієї десятої діаметра котушки, а максимальний - 1,5мм при діаметрах, що перевищують 15мм.

Власна резонансна частота вихорострумowego датчика, що визначається значеннями його індуктивності та паразитної міжвиткової ємності повин-

на бути не менше, ніж на порядок перевищувати значення другої робочої частоти. Ця міра запропонована для того, щоб виключити вплив власного резонанса перетворювача на результати вимірів в діапазоні частот.

Для зберігання однакової чутливості і точності вимірів на першій, другій і третій робочих частотах діаметр проводу намотки і крок намотки зберігають постійними для кожної трійки датчиків різних діаметрів, але з однаковими числами витків.

Кожну трійку вихорострумowych датчиків з однаковими числами витків, що працюють на нульовій, першій та другій робочих частотах об'єднують відносно загальної вісі в єдину конструкцію первинного вимірювального перетворювача. Пробовідбірник з електролітом розташовують на робочому торці перетворювача, при цьому вісь симетрії пробовідбірника повинна співпадати з загальною вісю первинного перетворювача.

В процесі роботи, при переключенні перетворювачів, що працюють на нульовій, першій і другій робочих частотах, узагальнений зазор $\alpha=2h/R_1$ (див.(4)) повинен залишатися постійним у крайньому разі для найближчого до поверхні електроліту витка, внесеної опір якого є найбільшим серед інших витків котушки. Інакше чутливість вимірів для датчика з меншим діаметром буде значно менше, ніж для датчика з більшим діаметром. Тому відстань між найближчим до поверхні електроліту витком кожного датчика первинного вимірювального перетворювача і поверхнею електроліту в пробовідбірнику задається пропорційною радіусу датчика. Але внаслідок того, що котушка датчика має більше ніж один виток, повністю компенсувати вплив зазору на результати вимірів не вдається. Тому в формулі (5) присутні поправки неповної компенсації зазору на нульовій і другій робочих частотах. Методику розрахунку цих поправок на конкретних даних наведено в прикладі 2.

Враховуючи досить значні діаметри проводу обмотки вихорострумowych датчиків відносно діаметрів датчиків (порядку 10%) для досягнення високої точності розрахунків питомої електричної провідності, необхідно враховувати механізм перерозподілу внесених в витки датчика опорів між цими витками за рахунок взаємодукції у вільному просторі. Методику таких розрахунків на конкретних даних наведено в прикладі 3.

Для того, щоб матеріал пробовідбірника не знижував добротність датчиків, пробовідбірник виготовляють з діелектрика, тангенс кута діелектричних втрат якого не вище 10^{-3} .

Наведені нижче приклади ілюструють суть ви-находу.

Приклад 1

В цьому прикладі проілюстрована методика вибору першої робочої частоти.

Залежність власної добротності вихорострумowego датчика $Q_0=\omega L_0/r$ від частоти має екстремальний характер. Це пояснюється тим, що зі збільшенням частоти спочатку переважний вплив на добротність робить зростання індуктивного опору, що стоїть в чисельнику. При цьому значення Q_0 збільшується. Потім починає превалювати збільшення активного опору проводу обмотки через витиснення струму в поверхневий шар проводу,

що має більш високий опір (скин-ефект). При цьому значення власної добротності зменшується. Величина і розташування екстремуму залежать від геометричної конфігурації вихорострумowego датчика, його розмірів, кількості витків, наявності і властивостей сердечника, стану поверхні проводу обмотки.

На фіг.3 приведена частотна характеристика власної добротності вихорострумowego датчика, що має наступні параметри: середній діаметр витка датчика $D_{cp}=15\text{мм}$, число витків $W=3$, діаметр мідного проводу $d_0=1,5\text{мм}$, повітряний сердечник.

Відповідно до даного графіка максимум власної добротності датчика спостерігається на частоті 90МГц, тому перша робоча частота дорівнює 90МГц.

Приклад 2

Розглянемо приклад визначення поправок неповної компенсації зазору на нульовій та другій робочих частотах.

Нехай $W=2$, середній діаметр витків вихорострумowego датчика, що працює на першій робочій частоті $D_1=9\text{мм}$, діаметр проводу обмотки усіх трьох датчиків первинного вимірювального перетворювача $d_0=1\text{мм}$, зазор між крайнім витком котушки датчика з $D_1=9\text{мм}$ і поверхнею електроліту в пробовідбірнику $h_1=1\text{мм}$. Функція впливу зазору $P(\alpha)$ входить в загальну функцію $F(\alpha, \beta)$ з (4) мультиплікативно, тобто у вигляді множника. Враховуючи те, що другий виток котушки відстоїть від поверхні матеріалу на відстані h_1 плюс діаметр проводу намотування першого витка d_0 (щільне намотування) вираз для $P(\alpha)$ має вигляд:

$$P = e^{\frac{-3h_1}{R}} + e^{\frac{-3(h_1+h_2)}{2R}} + e^{\frac{-3(h_2+h_1)}{2R}} + e^{\frac{-3h_2}{R}}, \quad (14)$$

де h_1 - зазор між першим витком котушки і поверхнею матеріалу, h_2 - зазор між другим витком котушки і поверхнею матеріалу.

Якщо $h_1=1\text{мм}$, а $h_2=2\text{мм}$, то для датчика діаметром $D_1=9\text{мм}$, що працює на першій робочій частоті $P_1=1,512$.

Нехай $q=1,5$. Тоді діаметр вихорострумowego датчика, що працює на нульовій робочій частоті $D_0=13,5\text{мм}$. Величина зазору між його крайнім витком та поверхнею електроліту в пробовідбірнику $h_1=1\text{мм}$ ($13,5\text{мм}/9\text{мм}$)= $1,5\text{мм}$. Для цього вихорострумowego датчика величина P , обчислена згідно (14) дорівнює $P_2=1,664$.

Діаметр вихорострумowego датчика, що працює на другій робочій частоті $0,06\text{мм}$. Величина зазору між його крайнім витком та поверхнею електроліту в пробовідбірнику $112 = 1\text{мм}$ - ($6\text{мм} / 9\text{мм}$)= $0,67\text{мм}$. Для цього вихорострумowego датчика величина P , обчислена згідно (14) дорівнює -

$$F(\lambda = S/2R) = 4\pi[(1 + \frac{3}{4}\lambda^2 - \frac{16}{64}\lambda^4 + \frac{35}{256}\lambda^6 + \dots)\ln\frac{4}{\lambda} - 2 - \frac{1}{4}\lambda^2 + \frac{31}{128}\lambda^4 = \frac{247}{1536}\lambda^6 + \dots] \quad (19)$$

Розглянемо приклад конкретного розрахунку внесеного активного опору двовиткової котушки відповідно до описаного механізму. Параметри котушки: $R=4\text{мм}$, $d_0=1\text{мм}$. Тоді з урахуванням (14)

$P_2=1,563$.

Множник P описує взаємодію витків котушки через провідне середовище. Так у виразі (14) перший доданок відповідає процесу збудження полем першого витка траєкторії вихрового струму в середовищі і взаємодії поля цього вихрового струму з першим витком. Другий доданок відповідає процесу взаємодії поля вихрового струму, наведеного першим витком, з другим витком. Третій доданок відповідає процесу взаємодії поля вихрового струму, наведеного другим витком, з першим витком. Четвертий доданок відповідає процесу взаємодії поля вихрового струму, наведеного другим витком з другим витком.

Поправка неповної компенсації зазору на нульовій робочій частоті визначиться згідно (4) і (5) як: $p(\alpha_0)=P_1/P_0=0,91$. Поправка неповної компенсації зазору на другій робочій частоті визначиться згідно (4) і (5) як: $p(\alpha_2)=P_1/P_2=0,97$.

Приклад 3

Крім взаємодії витків котушки через провідне середовище вони взаємодіють між собою з використанням механізму взаємодукації, перерозподіляючи внесені в кожен виток опори. Так, внесений в перший виток активний опір $R_{BH}^{(1)}$ за рахунок взаємодукації витків M забезпечує появу в другому витку внесеного опору $R_{BH}^{(2)}$:

$$R_{BH}^{(2)} = \frac{(\omega M)^2 R_{BH}^{(1)}}{\omega^2 L_0^2 + (r_0 + R_{BH}^{(1)})^2}, \quad (15)$$

де L_0 і r_0 - власні індуктивність і активний опір витка.

Якщо добротність витків вихорострумowego датчика $Q_1=\omega L_0/(r_0 + R_{BH}^{(1)}) \gg 1$, що в наших експериментах завжди виконується, то другим доданком у знаменнику (15) можна знехтувати.

$$R_{BH}^{(2)} = \left(\frac{M}{L_0}\right)^2 R_{BH}^{(1)}, \quad (16)$$

Тоді

Індуктивність витка визначається виразом [7]:

$$L_0 = \mu_0 R \left(\ln \frac{8D}{d_0} - \frac{7}{4} \right), \quad (17)$$

де D - діаметр витка котушки, d_0 - діаметр проводу.

Взаємна індуктивність двох співвісних витків визначається вираженням:

$$M = \frac{\mu_0}{4\pi} RF(S/2R), \quad (18)$$

де S - відстань між осьовими лініями проводів сусідніх витків, функція F дорівнює:

$$R_{BH}^{(1)} = R_{BH0} \left[e^{\frac{-3}{4} \left(\frac{1,5+1,5}{2} \right)} + e^{\frac{-3}{4} \left(\frac{1,5+2,5}{2} \right)} \right] = 0,548 R_{BH0} \quad (20)$$

де R_{BH0} - опір, внесений у перший виток при умові, що зазор між цим витком і поверхнею електроліту нескінченно тонкий; 1,5мм - відстань від осі першого витка до поверхні електроліту; 2,5мм - відстань від осі другого витка до поверхні плівки електроліту.

Внесений опір другого витка

$$R_{BH}^{(2)} = R_{BH0} \left[e^{-\frac{3}{4} \left(\frac{2,5+2,5}{2} \right)} + e^{-\frac{3}{4} \left(\frac{1,5+2,5}{2} \right)} \right] = 0,376 R_{BH0} \quad (21)$$

Таким чином, без урахування механізму взаємодії внесений опір двовиткової котушки дорівнює

$$R_{BH}(W=2) = R_{BH}^{(1)} + R_{BH}^{(2)} = 0,924 R_{BH0}, \quad (22)$$

Відношення M/L_0 з урахуванням (17) - (19) дорівнює:

$$\frac{M}{L_0} = \frac{F(S/2R)}{4\pi \ln \left(\frac{8D}{d_0} - \frac{7}{4} \right)}, \quad (23)$$

У нашому випадку $M/L_0 = 0,62$.

Тоді

$$\begin{aligned} R_{BH}(W=2) &= 0,924 R_{BH0} + 0,38 \\ R_{BH}^{(1)} + 0,38 R_{BH}^{(2)} &= 0,924 R_{BH0} + 0,208 R_{BH0} + 0,143 R_{BH0} = \\ &= 0,924 R_{BH0} + 0,351 R_{BH0} = 1,275 R_{BH0}, \end{aligned} \quad (24)$$

Величина $0,351 R_{BH0}$ в останній сумі (24) саме і забезпечується механізмом взаємодії. Таким чином внесений опір з урахуванням цього механізму збільшується 1,38 рази. Тому отримане при заданих вище параметрах вихорострумове датчика, що працює на нульовій робочій частоті, значення σ_0 необхідно розділити на цей коефіцієнт.

Приклад 4

У даному прикладі приведені результати дослідження та розрахунків питомої електричної провідності взірців рідинних електролітів ПК+LiClO₄ з різною концентрацією солі $C = 0,1M; 0,25M; 0,5M; 0,75M; 1,0M; 1,5M$.

Датчик, працюючий на першій робочій частоті, представляє собою коротку циліндричну котушку індуктивності з діаметром $D=15mm$ і числом витків $W=3$, діаметр мідного проводу обмотки $d_0=1,5mm$. Дослідження проводили з використанням вимірника добротності Tesla BM-409G.

Для визначення питомої електричної провідності σ електролітів скористаємося виразом [3]:

$$Z_u = 48 \cdot 10^{-7} \omega R_1 W^2 e^{-\frac{3}{2} \alpha} \beta^2 \frac{\operatorname{th} \frac{3}{4} \xi \sqrt{9 + j4\beta}}{3 \sqrt{9 + j4\beta^2} + (9 + j2\beta^2) \operatorname{th} \frac{3}{4} \xi \sqrt{9 + j4\beta^2}}, \quad (26)$$

де Z_u - внесений у вихорострумівий датчик комплексний опір: ω - кругова частота; R_1 - радіус котушки вихорострумівого датчика; W - число витків котушки; $\alpha = 2h/R_1$, де h - відстань між ближнім до поверхні досліджуваного електроліту витком котушки і цією поверхнею; $\beta = R_1 \sqrt{\omega \sigma \mu_0}$, де $\sigma = \sigma_0$ - питома електрична провідність досліджуваного електроліту, μ_0 - магнітна проникність вакууму ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{Гн/м}$), th - гіперболічний тангенс; $\xi = 2d/R_1$, де d - товщина шару електроліту в пробовідбірнику.

ку.

Для $\beta^2 \ll 1$ вираз (26) можна істотно спростити, - він стає дійсним (27).

При цьому внесений імпеданс Z_u перетвориться в активний опір:

$$R_u = 48 \cdot 10^{-7} \omega R W^2 e^{-\frac{3}{2} \alpha} \beta^2 \frac{\operatorname{th} \frac{3}{4} \xi}{9 \left(1 + \operatorname{th} \frac{3}{4} \xi \right)} \quad (27)$$

Дріб у виразі (27) залежить від товщини шару рідини в пробовідбірнику. Якщо виконується умова, що товщина шару електроліту в пробовідбірнику не менше ніж в 1,5 рази перевищує радіус вихорострумівого датчика, то ця залежність зникає і величина цього дробу приймає фіксоване значення 0,056.

Перетворюючи R_u у лівій частині (27) у відносний внесений опір $R_u/\omega L_0$, який ми визначаємо експериментальне і замінюючи β^2 на $R^2/\omega \sigma \mu_0$ одержимо

$$\frac{R_u}{\omega L_0} = R_u \omega C_0 = 48 \cdot 10^{-7} \omega^3 C_0 R^3 W^2 \left(e^{-\frac{3}{2} \alpha} \right)_{cp} \mu_0 \sigma_0,05 \quad (28)$$

Тут враховано, що при резонансі $\omega L_0 = 1/\omega C_0$, де L_0 - індуктивність вихорострумівого датчика, що працює на першій робочій частоті, C_0 - значення ємності резонансного контуру куметру. Для кожного з трьох витків котушки вихорострумівого датчика відстань до поверхні матеріалу складає: $h_1 = 1,0mm$; $h_2 = h_1 + d_0 = 2,5mm$; $h_3 = h_2 + d_0 = 4,0mm$, де $d_0 = 1,5mm$ - діаметр проводу котушки.

При цьому

$$\left(e^{-\frac{3}{2} \alpha} \right)_{cp} = 0,37$$

Розрахунок коефіцієнтів взаємодії $k_{12} k_{13} k_{23} k_{21} k_{31} k_{32}$, для витків вихорострумівого датчика, дає уточнюючий коефіцієнт 1,44 у лівій частині (26). З урахуванням цього із виразу (26) з використанням даних фіксованих у експерименті можна визначити значення σ_0 . Залежність σ_0 від концентрації солі ДшСдЩ₄ в електроліті, виміряна на частоті 90Мгц показана на фіг.6.

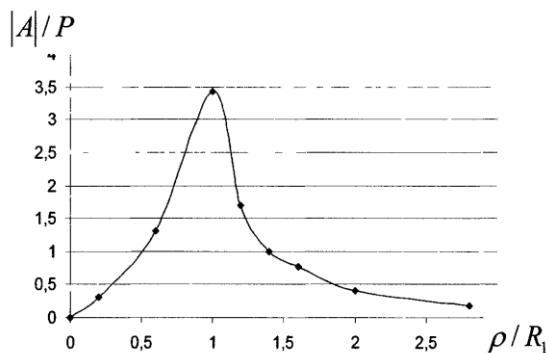
Збільшення σ_0 з ростом C , що спостерігається в області невеликих концентрацій, зв'язано з ростом числа молекул солі в одиниці об'єму електроліту. В області після максимуму визначальним є зниження коефіцієнта дисоціації, що і викликає загальне зниження електролітичної провідності при значних концентраціях солі.

Запропонований спосіб і первинний вимірювальний перетворювач можуть працювати, здійснюючи виміри в автоматичному режимі. Це дозволяє використовувати запропонований винахід також і для безконтактного вимірювання провідності різноманітних слабопровідних рідин в потоці, наприклад в трубопроводі.

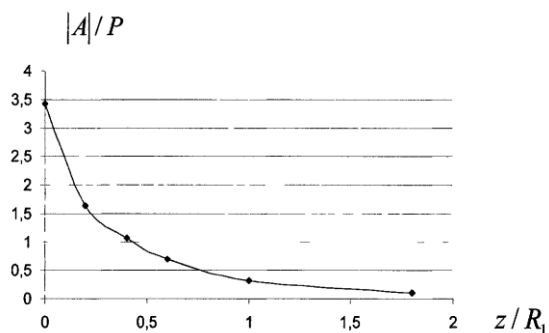
Джерела інформації:

US 2542057, Febr. 20, 1951, Relis, G 01 N 027/02.
US 3806798, Apr. 23, 1974, Gross, G 01 N 027/07.
US 4220920, Sept. 2, 1980, Gross, G 01 N 027/07.
US 4408202, Oct. 4. 1983, Fales, G09 G 003/16.

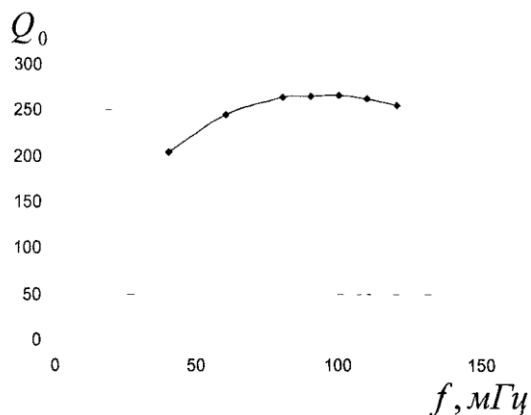
- US 4820990. Apr. 11, 1989, Moore, G 01 R 005/28.
 US 4825168. Apr. 25. 1989, Ogavaet. al, G 01 N 027/06.
 US 5077525, Dec. 31, 1991, West et. al, G 01 N 027/02.
 US 5157332, Oct. 20, 1992, Reese et. al, G 01 N 027/02.
 FR 2782802A1, Mar. 3, 2000, Coudray Pascal et. al, G 01 N 027/02.
 1. Гринберг Г. А. Избранные вопросы математической теории электрических и магнитных явлений. Из-во АН СССР, 1948.
 2. Wheelon A. D. Tables of summable series and



Фиг. 1



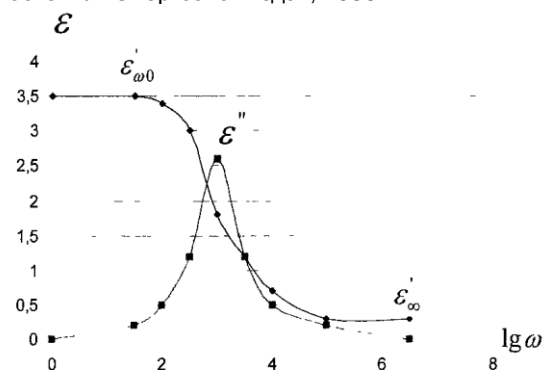
Фиг. 2



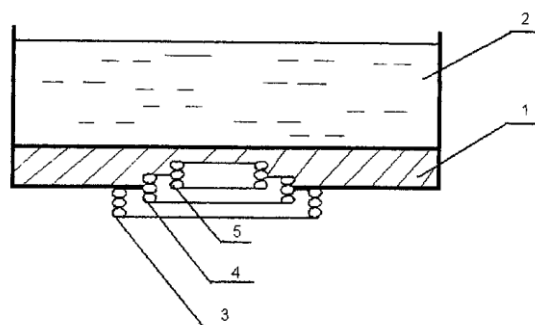
Фиг. 3

integrals involving Bessel functions. San Francisco: Holden - Day Inc, 1968.

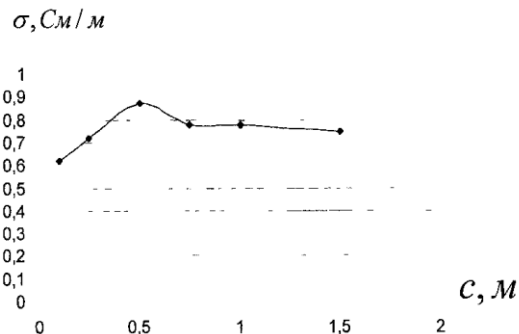
3. Соболев В. С., Щкарлет Ю. М. Накладные и экраные датчики. Новосибирск, «Наука», 1967.
 4. William Fuller Brown, JR. Dielectricss. Spinder-Verlag, Berlin, 1956.
 5. Hladic J. Physics of electrolytes. Vol. 1, Academic Press, 1972.
 6. Fröhlich H. Theory of dielectrics - dielectric constant and dielectric loss. Oxford, Clarendon Press, 1949.
 7. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей. Л. Энергоатомиздат, 1986.



Фиг. 4



Фиг. 5.



Фиг. 6.

