

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ІМПЕДАНСНОЇ СПЕКТРОСКОПІЇ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДІЕЛЕКТРИЧНИХ РІДИН

А. В. Мамикін, д. ф.-м. н. О. Л. Кукла, А. С. Майстренко,
О. С. Павлюченко, к. ф.-м. н. Є. П. Мацас

Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України
Україна, м. Київ
kukla@isp.kiev.ua

Розроблено та апробовано методику визначення відносної діелектричної проникності, тангенса кута діелектричних втрат та питомої провідності ізоляційних рідин, яка передбачає прикладання до досліджуваного розчину змінного електричного струму в області частот 0,1—10 Гц та вимірювання частотних залежностей активної та реактивної складових повного опору (імпедансу) розчину. Шукані значення відносної діелектричної проникності та питомої електропровідності визначають шляхом порівняння цих залежностей з теоретичними, а величина тангенса кута діелектричних втрат визначається із співвідношення реактивної та активної складових на фіксованій частоті.

Ключові слова: імпедансна спектроскопія, діелектрична проникність, питомий опір, ізоляційна рідина.

Визначення електрофізичних характеристик діелектричних рідин зазвичай проводять за результатами вимірювань електричної ємності C і електричного опору R конденсаторної комірки, заповненої досліджуваною рідиною [1]. При цьому вимірювання електричного опору R проводять за постійної електричної напруги, яка подається на електроди електрохімічної комірки. Наявність приелектродних ефектів на границі поділу «рідина — електрод» суттєво спотворює результати вимірювань питомої провідності ізоляційної рідини та тангенсу кута діелектричних втрат, внаслідок чого похибка їх визначення може складати десятки відсотків. Крім того, для вимірювання питомої провідності потрібен високовольтний прилад, який створює високе постійне електричне поле в рідкому діелектрику (більше 250 В/мм), що вимагає обслуговуючого персоналу відповідної кваліфікації. В роботі запропоновано застосовувати синусоїдальний електричний струм, що дозволяє в повній мірі виключити вплив приелектродних процесів на перенос заряду крізь комірку. При цьому для визначення величин R та C необхідно вимірювати повний електричний опір комірки (імпеданс).

В лабораторній практиці для вимірювань повного опору застосовують стандартні лабораторні вимірювачі імпедансу, які працюють в основному за мостовою схемою. При цьому нижня межа визначення тангенсу кута діелектричних втрат для подібних приладів становить 10^{-3} — 10^{-4} при мінімальній частоті вимірювань імпедансу 25—50 Гц. При типових значеннях питомої провідності 10^{14} — 10^{16} Ом·см та діелектричної проникності ≈ 2 , характерних для рідких діелектриків, розрахована величина тангенсу кута діелектричних втрат становить 10^{-4} — 10^{-7} , що значно менше межі чутливості для стандартних вимірювачів імпедансу і, відповідно, унеможлиблює їхнє застосування для визначення електрофізичних характеристик діелектричних розчинів. Для вирішення цієї проблеми пропонуємо проводити виміри повного опору (імпедансу) конденсаторної комірки в області частот від 0,1 до 10 Гц. В цьому випадку тангенс кута діелектричних втрат зростає приблизно на три порядки порівняно із вимірами на промисловій частоті 50 Гц, і для широкоживаних діелектричних рідин його значення буде складати 10^{-1} — 10^{-4} одиниць. Подібні значення тангенсу кута діелектричних втрат вже вдається досить точно вимірювати, застосовуючи стандартні широкоживані методики імпедансних вимірювань рідких речовин.

Вимірювання імпедансу електроізоляційних рідин в області частот 0,1—10 Гц пропонується проводити по схемі, що наведена в [2]. Генератор подає на конденсаторну комірку, заповнену досліджуваною ізоляційною рідиною, вхідну синусоїдальну змінну напругу фіксованої частоти (з діапазону 0,1—10 Гц). Послідовно з конденсаторною коміркою підключено опір навантаження R_n , з якого зні-

мається вихідна напруга. Вхідна та вихідна напруги синхронно оцифровуються двоканальним осцилографом і поступають на вхід пристрою математичної обробки вхідного та вихідного сигналів, де визначаються їх амплітуди (відповідно, A , B) та фазовий зсув між ними на фіксованій частоті вимірювань ($\Delta\varphi$). Конденсаторна комірка разом з опором навантаження формують подільник напруги, вхідна і вихідна напруги якого пов'язані співвідношенням $U_{\text{вих}} = U_{\text{вх}} R_n / (Z + R_n)$, де $U_{\text{вх}}$ та $U_{\text{вих}}$ – комплексні значення вхідної та вихідної напруг подільника, Z — повний опір комірки. Отже для повного опору (імпедансу) Z маємо вираз [3]

$$Z = R_n \left(\frac{A}{B} \cos \Delta\varphi + j \frac{A}{B} \sin \Delta\varphi - 1 \right).$$

За допомогою вказаного алгоритму можна отримати частотну залежність імпедансу, а з неї — шукані значення R та C .

В роботі також проаналізовано особливості проходження змінного струму через конденсаторну електрохімічну комірку з діелектричною рідиною. Визначено, що в розглянутому частотному діапазоні 0,1—10 Гц еквівалентна електрична схема комірки, заповненої діелектричною рідиною, має вигляд паралельно сполучених електричної ємності C комірки та електричного опору R шару діелектричної рідини між електродами комірки, що в свою чергу підтверджує відсутність впливу приелектродних ефектів на результати проведення вимірювань.

Розроблено та виготовлено портативний вимірювач імпедансу [4], який дозволяє в оперативному режимі здійснювати оцінку зазначених електрофізичних характеристик високоомних та діелектричних рідин.

Порівняно зі стандартною методикою [1] використання методу імпедансної спектроскопії дозволило знизити похибку визначення питомого опору до одиниць відсотків та, відповідно, проводити більш точне визначення експлуатаційних характеристик ізоляційних рідин, зокрема: чистоти органічних рідин, вологості та складу дво- та трикомпонентних рідких органічних сумішей, характеристик моторних палив (октанове число, фазову стабільність, оптимальне співвідношення паливно-повітряної суміші), якості трансформаторних масел тощо.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. IEC 60247:2004. Insulating liquids — Measurement of relative permittivity, dielectric dissipation factor ($\tan \delta$) and d.c. resistivity.
2. Кукла А. Л., Павлюченко А. С., Майстренко А. С., Мамыкин А.В. Импедансный анализатор для идентификации марок водно-спиртовых напитков // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2012. — № 1. — С. 15—21.
3. Кукла А.Л., Мамыкин А.В., Майстренко А.С., Павлюченко А.С. Экспресс анализатор параметров функциональных материалов на основе метода импедансной спектроскопии // Сенсорна електроніка і мікросистемні технології.— 2012— Т. 3(9). — №3. — С. 6—15.
4. Патент України на корисну модель UA № 109246 Портативний пристрій для визначення вологості матеріалів / Мамикін А.В., Кукла О.Л., Павлюченко О.С.— 2016.— Бюл. № 16.

A. V. Mamykin, A. L. Kukla, A. S. Maistrenko

Application of impedance spectroscopy for determination of electrical characteristics of dielectric liquids

The authors have developed and tested a method for determination of relative dielectric constant, dielectric losses tangent angle and conductivity of insulating liquids. The method includes applying of alternating electric current in frequency range from 0,1 to 10 Hz to the investigated solution and measurement of frequency dependences of active and reactive components of impedance. Desired value of relative dielectric constant and specific electric conductivity are determined by comparing these dependences with the theoretical ones while the value of dielectric losses tangent angle is determined from the ratio of reactive and active components at a fixed frequency.

Keywords: impedance spectroscopy, dielectric constant, resistivity, insulating liquid.