

УДК 621.372.81

Д.С. Морозов, асист.  
Житомирський державний технологічний університет

### ОСОБЛИВОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ДІЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРОНИКНОСТІ РІДИНИ, ЩО ПРОТІКАЄ КРІЗЬ КАПІЛЯР

*У даній статті наведено деякі особливості вимірювання діелектричної проникності слабких водних розчинів надвисокочастотним резонаторним методом, який ґрунтується на методі малих збурень, а саме: особливості вимірювання діелектричної проникності потоку рідини.*

**Вступ.** У сучасних умовах стрімкого розвитку медицини й фармакології зокрема необхідність в якісних і недорогих вимірювачах складу речовини стрімко зростає. Більша частина устаткування, що застосовується у виробництві лікарських препаратів, є дуже дорогою і потребує великих витрат на утримання й обслуговування. Це викликає необхідність створення нових методів і приладів для контролю стану речовини, що дадуть змогу здешевити виробництво й дати можливість контролювати склад лікарських препаратів у режимі реального часу в ході виробництва.

На відміну від більшості приладів для вимірювання й контролю складу речовин, прилади, принцип роботи яких ґрунтується на вимірюванні радіофізичних параметрів у НВЧ діапазоні, не потребують витратних матеріалів для свого функціонування, є нескладними у використанні й дають можливість значно пришвидшити процес вимірювання параметрів речовин [1–4].

Серед різноманіття методів НВЧ діелектрометрії виділяються методи вимірювання параметрів слабких водних розчинів з концентраціями порядку 1 %. Це пояснюється тим, що більшість білків і біополімерів є малорозчинними сполуками. Інформативність таких методів ґрунтується на відмінностях характеристик взаємодії «вільних» і «зв'язаних» молекул води з електромагнітним полем. У випадку малих концентрацій водні розчини являють собою діелектрики з великими втратами, для яких стандартні НВЧ методи вимірювання, як правило, не можуть бути використані. Тому для вимірювання водних розчинів розробляються спеціальні НВЧ-схеми й кюветні пристрої [3–7].

Однак більшість таких методів дозволяє вимірювати лише діелектричну проникність тільки у зразках певних стандартних форми й об'єму, що значно уповільнює темп досліджень і не дозволяє вимірювати зміни діелектричної проникності в режимі реального часу.

**Основна частина.** З усіх методів НВЧ діелектрометрії найбільшу популярність мають хвилевідні й резонаторні методи, що пояснюється великою роздільною здатністю. Головною особливістю даних методів є можливість використання дуже невеликого об'єму досліджуваної речовини [3–7]. Ця речовина (водний розчин) поміщається всередину хвилеводу або резонатора в радіопрозорому капілярі. Зняття й обробка зміни параметрів електромагнітних сигналів, що викликана зміною діелектричної проникності речовини у хвилеводі або резонаторі, займають лічені хвилини і є головною перевагою даних методів. Під час вимірювань за даними методиками інформацію про діелектричну проникність дослідницьких зразків несуть зміни резонансної частоти, послаблення сигналу і зміна добротності.

У даній статті розглядається резонаторний метод вимірювання діелектричної проникності. Він ґрунтується на використанні методу малих збурень порожнинного прямокутного резонатора тонким капіляром з водним розчином [8–9]. Вода в розчині сильно поглинає електромагнітний сигнал, що спричиняє зсув резонансної частоти, зменшення амплітуди та зміну добротності резонатора.

Конструкція резонатора показана на рисунку 1. Досліджуваний розчин – 1, діелектричний капіляр – 2, прямокутний резонатор – 3, втулка – 4.

Основою вимірювальної установки є прямокутний резонатор з резонансною частотою 2,5 ГГц (довжина хвилі – 12 см). Вибір такої частоти пояснюється тим, що максимальне поглинання енергії водою відбувається саме на цій частоті. Це дозволяє зменшити кількість рідини, необхідної для дослідження, і, відповідно, зменшити діаметр капіляра.

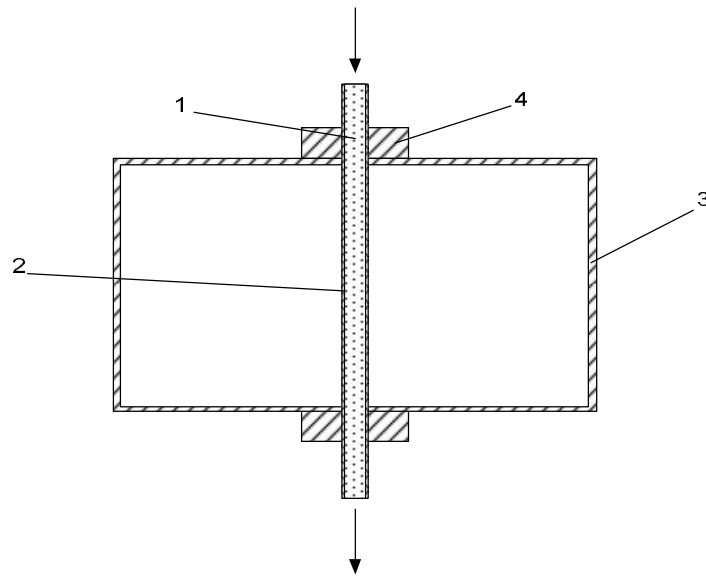


Рис. 1. Конструкція резонатора (поперечний переріз)

В резонаторі збуджуються електромагнітні коливання типу  $H_{101}$ . Такий тип коливань обраний для того, щоб поміщений у резонатор капіляр знаходився в максимумі електричного поля. Розміри резонатора –  $8,6 \times 4,3 \times 8,4$  см (відповідно сторони  $a, b, l$ ). Резонансна частота дорівнює:

$$f_{рез.} = \frac{3 \cdot 10^8}{2} \cdot \sqrt{\frac{1}{0,86^2} + \frac{1}{0,84^2}} = 2,5 \text{ ГГц.} \quad (1)$$

Особливістю даного резонатора є його збудження дрютяною петлею, розміри якої розраховані з урахуванням наявності капіляра з рідиною. Це дозволяє домогтися узгодження резонатора, що містить капіляр, із джерелом електромагнітних коливань без використання додаткових навантажень.

Використання петлі дозволяє без особливих зусиль, зміною своїх розмірів і розташування, домогтися узгодження джерела електромагнітних хвиль з резонатором, що містить капіляр з діелектриком.

Тому для знаходження розмірів петлі потрібно розв'язати електродинамічну задачу збудження резонатора з капіляром з рідиною-діелектриком.

Припустимо, що всередину резонатора введені джерела збудження у вигляді електричних струмів, а сторонні заряди відсутні. Тобто резонатор збуджується петлею.

Припустимо, що в резонаторі електромагнітне поле збуджується петлею, радіус якої малий, порівняно з довжиною хвилі. Рівняння для напруги на контактах петлі має такий вигляд:

$$U = RI + \frac{d\Phi}{dt}, \quad (2)$$

де  $\Phi = \Phi_m e^{i\omega t}$  – потік магнітного поля резонатора через площу петлі  $S$ ;  $R$  – активний опір петлі;  $I$  – струм, що тече по петлі.

Магнітний потік  $\Phi$  можна представити як потік вектора магнітної індукції через площу петлі, обмежену її контуром:

$$\Phi = \int_S \vec{B} d\vec{S} = \mu_0 \int_S \vec{H} d\vec{S}. \quad (3)$$

Підставивши (3) для магнітного потоку  $\Phi$  у перше рівняння й розділивши на струм  $I$ , одержимо вираз для вхідного опору петлі:

$$Z_{вх} = \frac{U}{I} = R + \frac{i\omega\mu_0}{I} \int_S \vec{H} d\vec{S}. \quad (4)$$

Усередині замкнутого порожнього резонатора з нескінченними провідними стінками можуть існувати власні коливання, електромагнітні поля яких задовольняють однорідні рівняння Максвелла:

$$\begin{aligned} \text{rot} \vec{E} &= -i\omega_v \mu_0 \vec{H}; \\ \text{rot} \vec{H} &= -i\omega_v \epsilon_0 \vec{E}, \end{aligned} \quad (5)$$

де  $\vec{E}$ ,  $\vec{H}$  – вектори напруженості електричного й магнітного полів в об’ємі;  $\omega_v$  – кругова частота коливань;  $\epsilon_0$ ,  $\mu_0$  – діелектрична й магнітна проникності вільного простору.

Електромагнітні поля в резонаторі можна представити у вигляді власних функцій  $\vec{E}_v$ ,  $\vec{H}_v$ , які є розв’язком однорідних рівнянь Максвелла (5). У нашому випадку в резонаторі існує тільки один тип поля, що визначається розмірами резонатора, тоді

$$\begin{aligned} \vec{E} &= e_v \vec{E}_v; \\ \vec{H} &= h_v \vec{H}_v. \end{aligned} \tag{6}$$

$$W = \frac{1}{2} \int_0^a \int_0^b \int_0^l \epsilon_0 |E_v|^2 dx dy dz. \tag{7}$$

Вираз (7) характеризує величину енергії електромагнітного поля, замкненого в об’ємі ідеального резонатора.

Для знаходження коефіцієнтів збудження складемо два коливальних рівняння. Взявши інтеграл по поверхні резонатора від векторного добутку полів дійсного й комплексно спряженого власного і представимо поле резонатора у вигляді власних функцій, помножених на коефіцієнти (6). Розглянувши ці рівняння відносно невідомих об’ємних інтегралів і проводячи нормування по енергії, накопиченій у резонаторі, отримуємо рівняння такого вигляду:

$$i\omega e_v - i\omega_v h_v = \int_V [\vec{J}, \vec{E}_v^*] dV; \tag{8}$$

$$i\omega_v e_v - i\omega h_v = \oint_S [\vec{E}, \vec{H}_v^*] dS. \tag{9}$$

У першому рівнянні  $\vec{J}$  – густина повного струму, що дорівнює сумі струму провідності і струму зміщення  $J = J_{\Pi} + J_{\epsilon}$ .

Поверхневий інтеграл у (9) описує втрати у стінках резонатора.

Інтеграл  $\int_V [\vec{J}, \vec{E}_v^*] dV$  визначає зв’язок амплітуди електричного поля в резонаторі з амплітудою струму, що тече в петлі, а також з амплітудою струму зміщення, що тече в капілярі.

$$\int_V [\vec{J}, \vec{E}_v^*] dV = \int_{V_n} [\vec{J}_n, \vec{E}_v^*] dV + \int_{V_k} [\vec{J}_{\epsilon}, \vec{E}_v^*] dV, \tag{10}$$

де  $V_n$  – об’єм петлі;  $V_k$  – об’єм капіляра,  $V = V_n + V_k$ .

Перший інтеграл у правій частині (10) описує поле петлі. Оскільки розміри петлі малі, то можливо прийняти, що магнітне поле резонатора в межах площі петлі постійне, й отримати наближену рівність:

$$\int_S i\omega \mu_0 \vec{H}_v \vec{ds} \approx i\omega \mu_0 \vec{H}_v \vec{n} S_{\Pi}, \tag{11}$$

де  $\vec{n}$  – нормаль до площі петлі  $S_{\Pi}$ .

Інтеграл, що описує зв’язок капіляра з полем резонатора, можна представити у вигляді:

$$\int_{V_{\epsilon}} [\vec{J}_{\epsilon}, \vec{E}_v^*] dV = \int_0^d \vec{E}_v^* dr \int_{S_k} \vec{J}_{\epsilon} dS, \tag{12}$$

де  $S_k$  – площа поперечного перерізу капіляра;  $d$  – діаметр капіляра;  $r$  – радіус капіляра.

Капіляр з рідиною, діелектрична проникність якої дорівнює  $\epsilon_p$ , еквівалентний сторонньому струму пустого резонатора з густиною:

$$\vec{J}_{\epsilon} = -i\omega(\epsilon_p - \epsilon_0)\vec{E}_v. \tag{13}$$

Підставляючи значення густини струму  $\vec{J}$  у (12), отримуємо:

$$\int_{V_{\epsilon}} [\vec{J}_{\epsilon}, \vec{E}_v^*] dV = -i\omega(\epsilon_p - \epsilon_0) \int_{V_{\epsilon}} |\vec{E}_v|^2 dV. \tag{14}$$

Тоді (8) і (9) матимуть вигляд:

$$i\omega\mathbf{e}_v - i\omega_v h_v = i\omega\mu_0 I S_n \vec{H}_v \vec{n} - i\omega(\varepsilon_p - \varepsilon_0) \int_{V_e} |\vec{E}_v|^2 dV ; \quad (15)$$

$$i\omega_v \mathbf{e}_v - i\omega h_v = h_v \sqrt{\frac{\omega\mu_0}{2\sigma}} (1+i) \int_S |H_v|^2 d\vec{s}. \quad (16)$$

Розв'язуючи (15) і (16) відносно  $h_v$ , отримуємо коефіцієнти власних функцій з (6). Підставляючи значення власної функції напруженості магнітного поля у формулу вхідного опору петлі, отримуємо:

$$Z_{BX} = R + \omega\mu_0^2 \vec{H}_v S_n^2 Q, \quad (17)$$

де  $Q$  – добротність резонатора.

Рівняння (17) дає можливість обчислити повний вхідний опір петлі. Перший член рівності являє собою чисто активний опір петлі, другий визначає опір, що вноситься полем резонатора. Омичним опором можна знехтувати. Тоді умовою узгодження джерела електромагнітних хвиль з резонатором є рівність опору резонатора, що вноситься, хвильовому опору лінії передачі:

$$\omega\mu_0^2 \vec{H}_v S_n^2 Q = p, \quad (18)$$

де  $p$  – хвильовий опір лінії зв'язку.

В такому випадку для узгодження джерела з резонатором площа петлі зв'язку дорівнюватиме:

$$S_n = \sqrt{\frac{p}{\omega\mu_0^2 \vec{H}_v S Q}}. \quad (19)$$

Петля даного розміру узгоджує джерело електромагнітних хвиль з резонатором, що містить капіляр.

Використання розчинів і рідин з високим значенням діелектричної проникності дозволяє використовувати досить тонкі капіляри й малі об'єми зразків.

Діелектрична проникність двокомпонентних водних розчинів, як показано в [7], є чудовим індикатором їх концентрації. Сама методика вимірювання є нескладною і полягає у вимірюванні зсуву резонансної частоти при пустому резонаторі й за наявності досліджуваного зразка, що визначається в основному величиною  $\varepsilon'$ , а також у знятті відповідних значень добротності резонатора по резонансних кривих, яка визначається величиною  $\varepsilon''$ .

У дослідницькій установці використано стандартні вимірювальні прилади (вимірювач КСХН панорамний Р2-53), що значно спрощує і здешевлює її експлуатацію.

На рисунку 2 продемонстровано зсув резонансної частоти й послаблення при заповненні капіляра рідинами різного складу. Резонансна крива 1 відповідає порожньому резонатору, крива 2 – капіляр, заповнений дистиллятом, крива 3 – водою з побутової мережі, крива 4 – фізіологічний розчин.

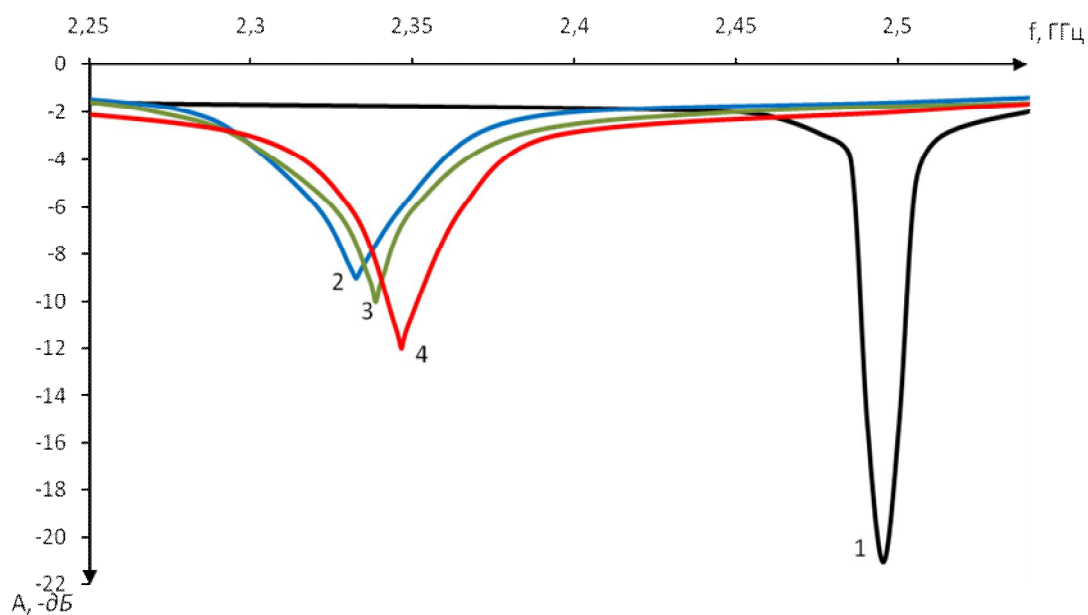


Рис. 2. Зміна частоти резонансу й послаблення при заповненні капіляра різними рідинами

На основі отриманих значень частоти резонансу та смуги пропускання за рівнем -3 дБ і знаючи об'єм, який займає рідина в капілярі, можна розрахувати значення дійсної та уявної складової комплексної діелектричної проникності за формулами:

$$\varepsilon' = 1 + \frac{(f_0 - f_p) \cdot V_{рез.}}{2f_0 \cdot V_{кан.}}; \quad (20)$$

$$\varepsilon'' = \frac{V_{рез.}}{4 \cdot V_{кан.}} \left( \frac{1}{Q_p} - \frac{1}{Q_0} \right), \quad (21)$$

де  $\varepsilon'$  і  $\varepsilon''$  – відповідно дійсна й уявна частини комплексної діелектричної проникності рідини в капілярі;  $f_0 - f_p$  – зсув частоти резонансу ( $f_0$  – частота резонансу порожнього резонатора,  $f_p$  – частота резонансу резонатора із заповненим капіляром всередині);  $V_{рез.}$  – об'єм прямокутного резонатора;  $V_{кан.}$  – об'єм капіляра з рідиною;  $Q_p$  і  $Q_0$  – добротності резонатора з капіляром і порожнього резонатора відповідно.

Використання тонкого капіляра дозволяє не тільки вимірювати діелектричну проникність рідини певного об'єму, а й у режимі реального часу слідкувати за зміною діелектричної проникності потоку досліджуваного водного розчину. Однак при таких вимірюваннях виникають певні особливості.

Перша й головна особливість – утворення при певних швидкостях руху рідини зон турбулентності, що спричиняють появу повітряних бульбашок, які спотворюють результати вимірювань. Максимальна швидкість потоку рідини крізь капіляр визначатиметься за такою формулою:

$$v = \frac{Re \cdot \eta}{d \cdot \rho}, \quad (22)$$

де  $v$  – швидкість руху рідини по капіляру;  $Re$  – число Рейнольдса (для круглої труби дорівнює 956);  $\eta$  – динамічна в'язкість рідини;  $\rho$  – густина рідини.

Так для капілярів діаметрами 1, 1,5 і 2 мм при температурі води 23 °С критична швидкість буде дорівнювати 0,96 м/с, 0,64 м/с та 0,48 м/с відповідно. Для цих капілярів при досягненні таких швидкостей будуть утворюватися бульбашки повітря, що викликані турбулентністю. Слід зазначити, що число Рейнольдса є доволі розмитим показником. Це впливає з того, що на наявність турбулентності, окрім усього зазначеного вище, впливають наявність первісних вихрів у капілярі, наявність вібрацій від насоса, що подає рідину, й головне – шорсткість внутрішньої поверхні капіляра. Саме ступеню внутрішньої обробки капіляра має приділятися особлива увага. Окрім цього, варто зазначити, що як в'язкість рідини, так і густина зменшуються зі зростанням температури, що необхідно враховувати в розрахунках.

Друга особливість вимірювання діелектричної проникності потоку рідини впливає з характеру взаємодії водного розчину з електромагнітним полем. Модель взаємодії пояснює порівняно високу добротність системи за рахунок поверхневої і, як наслідок, відносно слабкої взаємодії електромагнітних хвиль зі зразком, що поглинає, але водночас сильну залежність частоти і добротності резонансу від діелектричних властивостей рідкого зразка. В деяких роботах [6] зазначається наявність «висвічування» НВЧ поля крізь отвори хвилеводів і резонаторів, а також вплив ближніх зовнішніх ділянок капіляра на параметр резонансу. Під час руху рідини по капіляру ці впливи стають особливо відчутними.

Для ілюстрування можна навести залежність зсуву резонансної частоти й послаблення від величини заповнення капіляра. На рисунку 3 суцільними лініями показані резонансні криві для порожнього резонатора і чотирьох ступенів заповнення капіляра (незаповнений – 1, заповнений на 33 % – 2, заповнений на 66 % – 3, заповнений повністю – 4). На цьому ж графіку пунктирною лінією показано зміну резонансної частоти й послаблення при заповненні капіляра потоком рідини (крива 5). Ця невідповідність може пояснюватися як можливими впливами на резонанс ближніх заповнених ділянок капіляра, так і певними механічними чинниками (мікродеформації капіляра під час заповнення, утворення первісної турбулентної хвилі й поверхневий натяг).

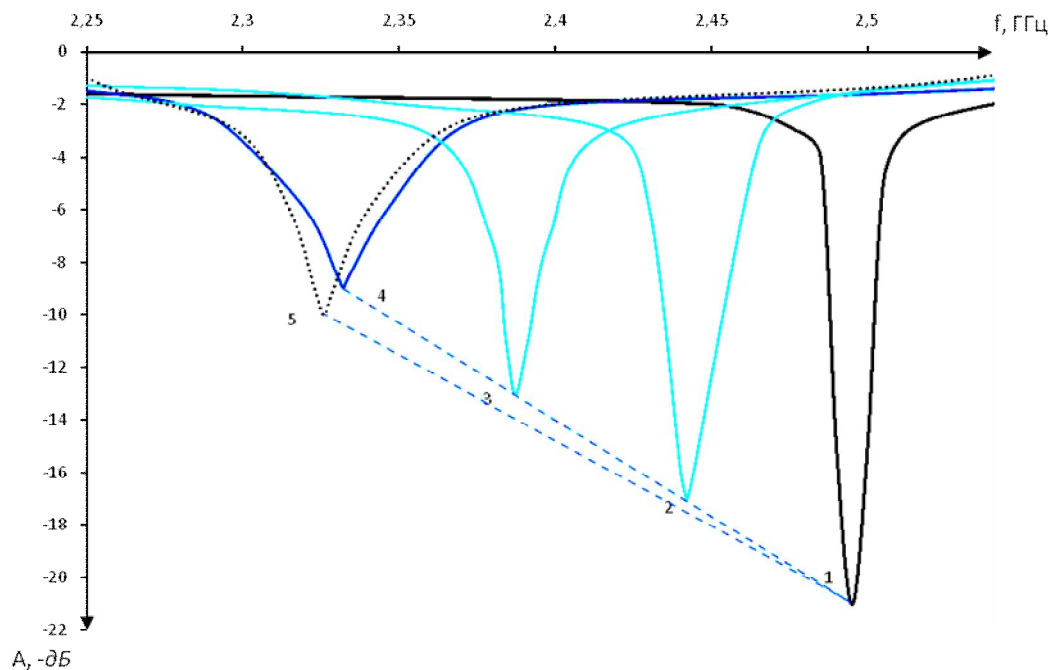


Рис. 3. Зсув резонансної частоти при неповному заповненні капіляра рідиною (крива 1 – порожній капіляр, крива 2 – заповнений на третину, крива 3 – заповнений на дві третини, крива 4 – повний) і зсув резонансної частоти під час поступового заповнення капіляра потоком рідини (крива 5)

Резонансна крива 5 на рисунку 3 демонструє зміну зсуву частоти резонансу й послаблення у випадку пропускання рідини крізь капіляр діаметром 2 мм на швидкості 0,3 м/с, порівняно з резонансною кривою 4 (капіляр повністю заповнений рідиною з нульовою швидкістю руху).

Пунктирна лінія 1–5 демонструє зміну частоти резонансу й послаблення під час заповнення капіляра потоком рідини на швидкості  $v$ . Для порівняння продемонстровано резонансні частоти й послаблення на кривих 2, 3 і 4.

Якщо припустити, що під час руху рідини зі швидкістю  $v$  крізь капіляр ближні заповнені рідиною ділянки капіляра, які лежать за межами резонатора, взаємодіють з полем у резонаторі, то рівняння балансу потужності в резонаторі можна представити у вигляді:

$$\int_V \left( \frac{\epsilon_0 \vec{E}^2}{2} + \frac{\mu_0 \vec{H}^2}{2} \right) dV + \sqrt{\frac{\omega \mu_0}{2\sigma}} (1+i) \int_{S_{рез.}} |\vec{H}| ds + i\omega(\epsilon_p - \epsilon_0) \int_{V'_k} |\vec{E}|^2 dV = \int_{S_n} i\omega \mu_0 \vec{H}^* ds, \quad (23)$$

де  $V$  – об’єм резонатора;  $\sigma$  – провідність стінок резонатора;  $S_{рез.}$  – площа поверхні резонатора;  $S_n$  – площа петлі;  $V'_k$  – об’єм капіляра.

Перший доданок у лівій частині рівняння є енергією електромагнітного поля в резонаторі, другий – описує втрати у стінках резонатора. Третій доданок – втрати енергії в капілярі з рідиною. Інтеграл у правій частині рівняння описує магнітне поле петлі, що збуджує коливання в резонаторі.

Тоді об’єм капіляра, що взаємодіє з електромагнітним полем, дорівнює:

$$V'_k = V_k + \Delta V_k = \pi \cdot r^2 \cdot (h + \Delta h), \quad (24)$$

де  $\Delta V_k$  – об’єм, на який збільшується об’єм капіляра, що взаємодіє з електромагнітним полем резонатора, за рахунок руху рідини зі швидкістю  $v$ ;  $h$  – висота заповненої водою ділянки капіляра. При повністю заповненому капілярі  $h = b$ .

Таким чином, за рахунок висвічування поля крізь отвір у широкій стінці резонатора об’єм рідини, що взаємодіє з електромагнітним полем, збільшується на  $\Delta V_k = \pi \cdot r^2 \cdot \Delta h$ . Зі зростанням швидкості  $v$  об’єм рідини, що взаємодіє з  $V'_k$ , збільшується.

Такі невідповідності показів вносять похибки у значення діелектричної проникності й перешкоджають точному вимірюванню складу речовини. Для їх уникнення слід проводити вимірювання лише при повністю заповненому капілярі й під час уже встановленого швидкісного режиму потоку рідини.

Окрім зазначених вище особливостей вимірювання діелектричної проникності потоку рідини, слід виділити значний вплив температурного фактора на значення комплексної діелектричної проникності. Зміна температури досліджуваного зразка на 1–2 °С призводить до зміни значень дійсної та уявної діелектричної проникності на 3–4 %. Це вимагає неабиякої уваги до зберігання і використання досліджуваних зразків, а також температурного режиму роботи дослідницької установки.

**Висновки.** Підсумовуючи наведені у статті особливості вимірювання діелектричної проникності слабких водних розчинів, слід зазначити, що дана методика дозволяє досить оперативно слідкувати за концентрацією речовин у розчині й може стати доступною заміною дорогим вимірювальним комплексам. Використання діелектричних капілярів різного діаметра дозволяє проводити вимірювання при різних швидкостях руху рідини, що є необхідним для настройки під певний технологічний процес виробництва лікарських речовин.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Мищенко С.В. Проектирование радиоволновых (СВЧ) приборов неразрушающего контроля : учеб. пособие / С.В. Мищенко, Н.А. Малков. – Тамбов : изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2003. – 128 с.
2. Блудов Ю.В. Распространение Н10 волны в прямоугольном волноводе с диэлектрической неоднородностью / Ю.В. Блудов // Журнал технической физики. – 2005. – Т. 75. – Вып. 8. – С. 99–105.
3. Резонансный метод измерения комплексной диэлектрической проницаемости водных растворов / А.Я. Кириченко, В.И. Луценко, Ю.Ф. Филиппов, Ю.В. Прокопенко // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2006. – Т. 11, № 9. – С. 34–41.
4. Температурно-диэлектрическая спектроскопия водных растворов с использованием метода капиллярно-волнового резонанса / А.Я. Кириченко, В.И. Луценко, Ю.Ф. Филиппов, Ю.В. Прокопенко // Известия ВУЗов. Радиофизика. – 2008. – Т. VI, № 8. – С. 711–716.
5. СВЧ-анализатор концентрации жидких фармацевтических препаратов / Г.Ф. Бакушина, Е.В. Беляков, Н.Б. Зиновьева, А.М. Храпко // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. – 1986. – Вып. 9(393). – С. 54–56.
6. Беляков Е.В. Перестраиваемый СВЧ-резонатор для измерения поглощающих жидкостей / Е.В. Беляков // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. – 1989. – Вып. 10(424). – С. 59–61.
7. Беляков Е.В. СВЧ-установка миллиметрового диапазона волн для исследования и контроля концентрации водных растворов / Е.В. Беляков, А.М. Храпко // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. – 1986. – Вып. 10(394). – С. 34–36.
8. Величко Д.А. Влияние ортоборной кислоты на диэлектрическую проницаемость теплоносителя-замедлителя ВВЭР / Д.А. Величко, Е.В. Одноволик, А.Н. Роевко // 15-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2005) : мат. конф. (Севастополь, 12–16 сентября 2005 г.). – Севастополь : Вебер, 2005. – С. 783–784.
9. Радин Ю.П. Об одном методе измерения диэлектрической проницаемости в сантиметровом диапазоне / Ю.П. Радин // Известия ВУЗов. Радиофизика. – 1958. – № 5–6. – С. 177–179.

МОРОЗОВ Дмитро Сергійович – асистент кафедри радіотехніки і телекомунікації Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- діелектрометрія;
- СВЧ-методи дослідження складу речовини;
- об'ємні резонатори;
- збудження об'ємних резонаторів.

Тел.: (096)3547293.

E-mail: [frostoff@bigmir.net](mailto:frostoff@bigmir.net).

Подано 25.05.2010

**Морозов Д.С.** Особливості вимірювання діелектричної проникності рідини, що протікає крізь капіляр  
**Морозов Д.С.** Особенности измерения диэлектрической проникности жидкости, которая протекает через капилляр

УДК 621.372.81

**Особенности измерения диэлектрической проникности жидкости, которая протекает через капилляр / Д.С. Морозов**

В данной статье приведены некоторые особенности измерения диэлектрической проницаемости слабых водных растворов сверхвысокочастотным резонаторным методом, который основывается на методе малых возмущений, а именно: особенности измерения диэлектрической проницаемости потока жидкости.

УДК 621.372.81

In this article some features over of measuring of permittivity of weak aquatic solutions are brought by a super-high-frequency resonator method which is based on the method of small indignations, namely: features of measuring of inductivity of stream of liquid.