

## **ШУМОВА ОЦІНКА ОПОРУ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ**

*В статті розглянуто принципи побудови приладів для вимірювання електричного опору діелектричних матеріалів та запропоновано нову структуру шумового вимірювача опору, який забезпечує можливість оцінки значень опору діелектричних матеріалів без пропускання через них електричного струму. Запропонована схема дозволяє підвищити співвідношення сигнал/перешкода, а кореляційна обробка вихідної напруги резонансного ланцюга двома незалежними підсилювачами сприяє придушенню впливу власних шумів на результат вимірювання опору.*

**Ключові слова:** електричний опір, діелектричний матеріал, теплові шуми.

Для кількісної та якісної оцінки фізико-хімічних параметрів діелектричних матеріалів в багатьох практичних реалізаціях вимірювальних схем використовують значення електричного опору. За його величиною оцінюють вологість, концентрацію домішок та інші параметри матеріалів. У більшості випадків значення опору (або електропровідності) отримують традиційними методами, шляхом пропускання через матеріал електричного струму. Але, в ряді випадків пропускання струму через досліджуваний матеріал викликає його нагрів, порушує молекулярну структуру матеріалу через електрохімічні явища та ін. Це суттєво спотворює результат вимірювань та приводить до збільшення похибок. Особливо це стосується матеріалів рослинного та біологічного походження, нестійких хімічних сполук.

В таких випадках перспективним є використання власних теплових шумів діелектричних матеріалів, як інформативного параметру для оцінки опору.

### **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Відомо, що в діелектиках, навіть при відсутності вільних носіїв електричного заряду (електронів, іонів та ін.), які зумовлюють електропровідність матеріалу, через наявність в них термозбуджених поляризованих молекул виникає тепловий шум, який утворюють елементарні флюктуючі диполі. Рівень шумової теплової напруги визначається термодинамічною температурою матеріалу і величиною діелектричних втрат. На цьому ґрунтується можливість оцінки електричного опору за значеннями шумового струму або напруги, які наводяться в емнісних чи індуктивних сенсорах [1].

Серед публікацій, присвячених оцінці електричного опору шляхом вимірювання власних теплових шумів, можна виділити декілька технічних

рішень [2, 3, 4], які дозволяють здійснювати такі вимірювання. Проте, на результат вимірювання при використанні одноканальних схем [2] суттєво впливають власні шуми підсилювачів та інших елементів перетворювального тракту, що приводить до значних похибок вимірювання. Використання двоканальних засобів вимірювання [3] дозволяє позбутися цього недоліку, але при цьому не враховується можливість зміни температурного режиму досліджуваного діелектрика, яка безпосередньо впливає на рівень теплових шумів і, відповідно, на величину термошумового опору.

Виключення впливу температури на результат вимірювання опору [4] здійснюється шляхом вимірювання опору зразкового резистора за його шумами і обчислення відношення опору вимірюваного об'єкта і опору зразкового резистора.

Однак, в багатьох випадках відсутня можливість розміщення зразкового резистора в тепловому контакті з досліджуваним об'єктом. Та й опір зразкового резистора з плином часу змінюється випадковим чином, особливо при високих температурах в процесі тривалої експлуатації.

### **Постановка завдання**

Основною задачею даної роботи є використання структурно-алгоритмічного підходу до підвищення точності вимірювання електричного опору діелектричних матеріалів за рівнем їх власних теплових шумів. Результатом дослідження є розробка алгоритму роботи вимірювача термошумового опору та функціональна схема, що його реалізує, забезпечуючи отримання сигналу, пропорційного опору досліджуваного об'єкта незалежно від його температури і співрозмірних з шумами самого об'єкту теплових шумів перетворювального тракту.

### **Основна частина**

Функціональна схема пристрою для шумової оцінки опору діелектричних матеріалів, яка забезпечує рішення поставленої задачі, показана на рис. 1.

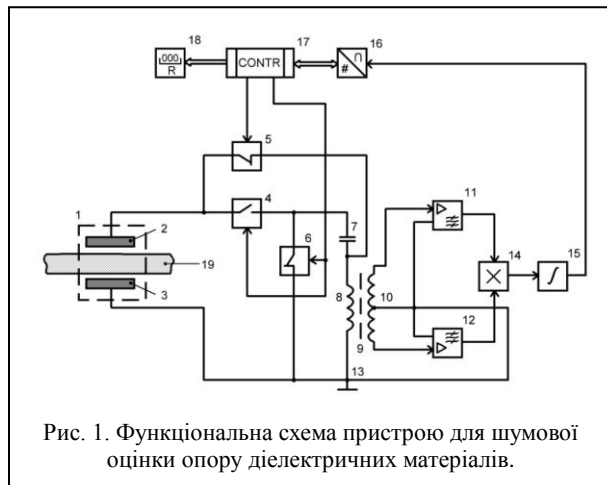


Рис. 1. Функціональна схема пристрою для шумової оцінки опору діелектричних матеріалів.

Робота запропонованого пристрою здійснюється таким чином.

Досліджувані об'єкти 19 розміщують між електродами 2 і 3 ємнісного датчика 1. За програмою, записаною в пам'ять мікроконтролера 17, керовані ключі 4, 5 і 6 встановлюються у зазначене на схемі положення. При цьому конденсатор 7 з індуктивністю первинної обмотки котушки 8 утворюють паралельний коливальний контур. Резонансна частота коливального контуру визначається за формулою:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}},$$

де  $L$  - індуктивність первинної обмотки 8 високочастотного трансформатора 9;  $C$  - ємність конденсатора 7.

На частоті резонансу  $f_0$  коливальний контур має активний опір

$$R_k = \frac{L}{Cr},$$

де  $r$  - активний опір первинної обмотки 8 високочастотного трансформатора 9.

При високій добротності первинної обмотки 8 опір  $r$  малий, а опір коливального контура  $R_k$  великий:

$$R_k \gg ReZ,$$

де  $ReZ$  - активна складова комплексного опору ємнісного датчика 1.

Оскільки опір паралельного контура  $R_k \gg ReZ$ , то виникає режим холостого ходу, при якому

середньоквадратична шумова напруга на контурі, у відповідності до формули Найквіста, стає рівною

$$U_p = \sqrt{4kT_x \Delta f ReZ}.$$

де  $k$  - постійна Больцмана;  $T$  - температура досліджуваного об'єкта;  $\Delta f$  - смуга частот спектру теплових шумів, що виділяються коливальним контуром.

Шумова напруга (4) трансформується у вторинну обмотку 10 високочастотного трансформатора 9 до значення

$$U_1 = K_1 U_p.$$

де  $K_1$  - коефіцієнт трансформації.

Вихідна напруга (5) високочастотного трансформатора 9 представляє собою вузькосмуговий випадковий сигнал, який разом з власними шумами вузькосмугових підсилювачів 11 і 12 підсилюється, квадратується за рахунок перемноження в перемножувачі 14 і усереднюється в інтеграторі 15. При перемноженні шумових сигналів слід враховувати, що усереднений добуток двох випадкових некорельованих сигналів від незалежних джерел при широкій смузі частот вузькосмугових підсилювачів 11 і 12, близький до нуля тобто не дає постійної складової напруги. В той же час підсилення двох вузькосмугових сигналів від одної обмотки трансформатора 9 з заземленою середньою точкою при наступному перемноженні і усередненні дає постійну складову напруги за рахунок їх взаємної кореляції. В результаті вплив власних шумів вузькосмугових підсилювачів 11 і 12 придушується, а підсилений інформативний тепловий шум, що виділяється резонансним ланцюгом, перетворюється в постійну напругу:

$$U_2 = \frac{1}{4} K_2 K_3 S K_4 \bar{U}_1^2,$$

де  $K_2$  і  $K_3$  - коефіцієнти підсилення вузькосмугових підсилювачів 11 і 12;  $S$  - крутизна множильного перетворювання перемножувача 14;  $K_4$  - коефіцієнт передачі інтегратора 15.

Постійна напруга (6) перетворюється в цифровий код аналогово-цифровим перетворювачем 16. Цифровий код надходить в мікроконтролер 17, де запам'ятовується його значення

$$N_1 = \frac{1}{4} \frac{K_2 K_3 S K_4 \bar{U}_1^2}{q},$$

де  $q$  - одиниця молодшого розряду аналогово-цифрового перетворювача 17.

Далі за командою мікроконтролера 17 керований ключ 4 замикається, а керовані ключі 5 і 6 розмикаються. В результаті цього коливальний контур з конденсатора 7 і первинної обмотки 8

високочастотного трансформатора 9 перетворюється у послідовний. Опір контура різко зменшується.

На конденсаторі 7 і первинній обмотці 8 резонансного ланцюга виникає резонанс шумових напруг і шумовий струм в режимі короткого замикання визначається тільки внутрішнім опором джерела шуму. Згідно з формулою Найквіста шумовий середньоквадратичний резонансний струм

$$I_p = \sqrt{\frac{4kT_x \Delta f}{ReZ}}$$

При паралельній схемі електродної системи смісного датчика 1 активна складова

$$ReZ = \frac{tg \delta}{2\pi f_0 C (1 + tg^2 \delta)}$$

де  $tg \delta$  - тангенс кута діелектричних втрат досліджуваного матеріалу.

Смуга частот теплового шуму, що виділяються контуром

$$\Delta f = \frac{f_0}{Q}$$

де  $Q$  - добротність коливального контуру.

Резонансний шумовий струм (8) створює на первинній обмотці 8 високочастотного трансформатора 9 падіння напруги

$$U_3 = 2\pi f_0 L I_p$$

яка трансформується у вторинну обмотку 10 до значення

$$U_4 = K_1 U_3$$

Шумова напруга (12) підсилюється двома вузькосмуговими підсилювачами 11 і 12 і квадратується перемножувачем 14. Після усереднення добутку шумів інтегратором 15, в результаті якого виділяється постійна складова напруги, і наступних перетворень, аналогічних до попередніх формується друге значення цифрового коду

$$N_2 = \frac{1}{4} \frac{K_2 K_3 S K_4 \bar{U}_3^2}{q}$$

яке запам'ятовується у мікроконтролері 17.

Далі в мікроконтролері у відповідності до програми проводиться обчислювальна операція, в результаті якої утворюється цифровий код відношення кодів

$$N_3 = \frac{N_1}{N_2} = ReZ^2$$

Наступна обчислювальна операція передбачає взяття квадратного кореня з коду (16):

$$N_4 = \sqrt{N_3} = ReZ$$

Отриманий цифровий код (15) перетворюється у зручну для відліку форму і виводиться на цифровий індикатор 18.

## Висновки

Запропонована схема шумового вимірювача забезпечує можливість вимірювання опору в непровідних діелектричних матеріалах без пропускання через них електричного струму, за рахунок використання теплових шумів, обумовлених тепловим рухом молекул та носіїв заряду.

В запропонованому авторами термошумовому вимірювачі опору вхідний резонансний ланцюг схеми автоматично переналаштовується з режиму паралельного резонансу струмів на режим послідовного резонансу напруг, що забезпечує для досліджуваного об'єкта режим холостого ходу і режим короткого замикання. При таких режимах вихідна напруга резонансного контуру виявляється пропорційною напрузі теплових шумів. Підсилення отриманих шумових напруг двома незалежними вузькосмуговими підсилювачами, налаштованими на частоту резонансу резонансного контуру, наступне їх перемноження і усереднення інтегратором дозволяє придушити вплив власних шумів підсилювачів.

Виділення шумового струму і шумової напруги безпосередньо на виході вимірювальної схеми резонансним ланцюгом зі змінною структурою підвищує співвідношення сигнал (корисний шум)/перешкода, а наступна кореляційна обробка вихідної напруги резонансного ланцюга двома незалежними підсилювачами з вузькою смугою пропускання сприяє придушенню впливу власних шумів на результат вимірювання опору.

Для виключення впливу неінформативних низькочастотних шумів і перешкод (фліккер-шуму, вібрацій, наводок), а також високочастотних радіоперешкод і електромагнітних полів доцільно інформаційний тепловий шум виділяти резонансним ланцюгом в діапазоні високих частот (10...20) МГц при ширині смуги пропускання ланцюга  $\Delta f = (5...10)$  кГц. З врахуванням статистичної природи шумового струму і напруги час вимірювання слід обирати досить великим (кілька секунд і більше), що задається постійною часу інтегратора і періодом перемикавання ключів, який задається мікроконтролером.

## Список літератури

1. Ван дер Зил А. Шум. Источники, описание, измерение/ Пер. с англ. - М.: "Сов. радио", 1973. - с. 27-30.
2. Термошумовий спосіб вимірювання опорів високоомних об'єктів. Патент України №14264, опуб. 15.05.2006, бюл. № 5.

3. Термошумовий виміррювач. Патент України №16535, МПК G01N27/04, опуб. 15.08.2006, бюл. № 8.

4. Термошумовий спосіб контролю якості діелектричних матеріалів. Патент України № 28453, МПК G01R 31/02, опуб. 10.12.2007, бюл. № 20.

**Автори: ШЕВЧЕНКО Костянтин Леонідович**

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ, кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації експериментальних досліджень.

Роб. тел. – 256-29-93, дом. тел. – 227-81-94, E-mail – autom1@meta.ua.

**ГОРКУН Валентина Василівна**

Київський національний університет технологій та дизайну, Київ, старший викладач кафедри автоматизації та комп'ютерних систем.

Роб. тел. – 256-21-89, дом. тел. – 253-66-89, E-mail – autom1@meta.ua.

**ВАСИЛЕНКО Микола Павлович**

Київський національний університет технологій та дизайну, Київ, аспірант кафедри автоматизації та комп'ютерних систем.

Роб. тел. – 256-29-63, E-mail – autom1@meta.ua.

### **Шумовая оценка сопротивления диэлектрических материалов**

К.Л. Шевченко, В.В. Горкун, М.П. Василенко

В статье рассмотрены принципы построения приборов для измерения электрического сопротивления

диэлектрических материалов и предложена новая структура шумового измерителя сопротивления, который обеспечивает возможность оценки значений сопротивления диэлектрических материалов без пропускания через них электрического тока. Предложенная схема позволяет повысить соотношение сигнала/шум, а корреляционная обработка выходного напряжения резонансной цепи двумя независимыми усилителями способствует подавлению влияния собственных шумов на результат измерения сопротивления.

**Ключевые слова:** электрическое сопротивление, диэлектрический материал, тепловые шумы.

### **Noise assessment of resistance of dielectric materials**

K.L. Shevchenko, V. V. Gorkun, M.P. Vasilenko

In article the principles of creation of devices for measurement of electric resistance of dielectric materials are considered and the new structure of the noise measuring instrument of resistance which provides possibility of an assessment of values of resistance of dielectric materials without transmission through them electric current is offered. The offered scheme allows to raise a ratio signal/noise, and correlation processing of output tension of a resonant chain by two independent amplifiers promotes suppression of influence of own noise on result of measurement of resistance.

**Keywords:** electric resistance, dielectric material, thermal noise.