

УДК 621.3.082

**О.Є. Максимова**

викладач,
Херсонський
політехнічний коледж,
Одеський національний
політехнічний
університет
e-mail: Lira_Sol@mail.ru

**Н.Є. Уткіна**

викладач-методист,
Херсонський
політехнічний коледж,
Одеський
національний
політехнічний
університет
e-mail: Utkina-
kherson@rambler.ru

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ ЄМНОСТІ ТА ІНДУКТИВНОСТІ РАДІОКОМПОНЕНТІВ

О.Є. Максимова, Н.Є. Уткіна.
Аналіз методів вимірювання ємності та індуктивності радіокомпонентів.
Розглядаються методи вимірювання опору, ємності та індуктивності радіокомпонентів. Точність вимірювання залежить від обраного методу та схеми пристрою вимірювання.

O.E. Maximova, N.E. Utkina.
Analysis of methods of measuring of capacity and inductance of radio-components. The methods of measuring of resistance, capacity and inductance of radiocomponents are examined. Measuring exactness depends on a select method and chart of device of measuring.

Вступ. Розвиток науки нерозривно пов'язаний з прогресом в області вимірів. Виміри - один із способів пізнання. Тому багато наукових досліджень супроводжуються вимірами, що дозволяють встановити кількісні співвідношення і закономірності явищ, що вивчаються [1-2]. Історія науки знає приклади, які говорять про те, що прогрес в області вимірів сприяв новим відкриттям. У свою чергу, досягнення науки сприяли вдосконаленню методів і засобів вимірів.

Всі фундаментальні та технічні науки базуються на застосуванні відповідних аналітичних формул. Фізичні величини (ФВ), що входять в них, виражаються числами і являються вимірювальною інформацією. Основною ознакою систематизації є приналежність ФВ до однієї зі сторін явищ: речової (фізичні та фізико-хімічні властивості речовин); енергетичної (властивості, що відбиває енергетичні характеристики процесів); інформаційної (властивості, що відображають динамічні і статичні характеристики процесов).

Автоматизація і комп'ютерні технології

У зв'язку з вивченням явищ електрики, і внаслідок цієї появи науки електротехніки, пов'язаної з використанням явищ електрики для практичних потреб (для зв'язку, енергетики, управління тощо), стали створюватися прилади електровимірювань.

До групи електричних вимірювань відносяться вимірювання напруги, струму, потужності, енергії та параметрів електричних кіл. [3].

У колах змінного струму необхідно вимірювати, крім електричного опору, такі фізичні величини, як індуктивність, ємність, реактивний, активний та повний опори, добротність, кути втрат тощо.

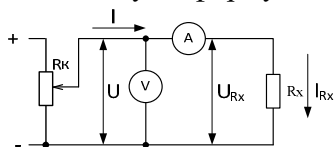
Основним параметром будь якого вимірювання є її точність, яка залежить від прийомів і засобів отримання результатів вимірювань. [4]

Отже при побудові вимірювача ємності та індуктивності виникає ряд ускладнень що до визначення методів вимірювання, кожний з яких відрізняється за точність та діапазоном виміру. Метою дослідження є аналіз та синтез існуючих методів вимірювання та визначення послідовності проектування автономного пристрою виміру ємності та індуктивності для забезпечення лабораторного практикуму у навчальних закладах.

Матеріал і результати дослідження. Існує декілька груп прийомів отримання результатів вимірювання - прямі, непрямі, спільні, сукупні.

Пряме вимірювання - значення фізичної величини, що вимірюється, отримують безпосередньо з експериментальних даних. Пряме вимірювання проводиться шляхом експериментального порівняння вимірюваної ФВ з мірою цієї величини або шляхом відліку показань системи СІ за шкалою аналогового або цифрового приладу. Наприклад, вимірювання сили струму I через резистор і падіння напруги U на ньому за допомогою амперметра та вольтметра (рис.1).

Непряме вимірювання - значення ФВ знаходять на підставі результату прямого виміру інших ФВ, функціонально пов'язаної з шуканою величиною відомою залежністю між цією ФВ і величиною, одержуваної прямим виміром. Наприклад, визначення значення активного опору R_x резистора на основі прямих вимірювань сили струму I через резистор і падіння напруги U на ньому за формулою закону Ома (рис.1).



Автоматизація і комп'ютерні технології

Рис. 1. Вимірювання активного опору за допомогою амперметра та вольметра

Можна відзначити, що вимірювання, в яких величина, що вимірюється, визначається на основі прямих вимірювань основних фізичних величин системи та при використанні фізичних констант, називаються абсолютними.

Непрямі вимірювання складніші за прямих, однак, вони широко використовуються в практиці тому, що прямі вимірювання практично нездійсненні, або тому, що непрямі вимірювання дозволяють отримати більш точний результат в порівнянні з прямим виміром.

Сукупність прийомів використання принципів і засобів вимірювань становить метод вимірювання. Різні методи вимірювань відрізняються насамперед організацією порівняння вимірюваної величини з одиницею вимірювання: методи безпосередньої оцінки і методи порівняння з мірою.

При методі безпосередньої оцінки значення вимірюваної величини визначається безпосередньо по відліковому пристрою вимірювального приладу прямої дії. На цьому методі засновані всі стрілочні прилади (вольтметри, амперметри, ватметри, лічильники електричної енергії, термометри, тахометри і т.п.). Точність вимірювань за методом безпосередньої оцінки в більшості випадків невелика і обмежується точністю застосовуваних вимірювальних приладів.

Метод порівняння з мірою - це метод, в якому вимірювальна величина порівнюється з величиною, що відтворюється мірою. Метод в якому вимірювана величина і величина, що відтворена мірою, одночасно впливають на прилад порівняння, за допомогою якого встановлюється співвідношення між цими величинами, називається методом протиставлення. У цьому випадку при якісному виконанні пристрою порівняння може бути досягнута висока точність вимірювання.

Диференційний метод - це метод порівняння з мірою, в якому на вимірювальний прилад діє різниця вимірюваної величини і еталонної величини, що відтворюється мірою. Цей метод дозволяє отримувати результати вимірювань з високою точністю навіть у разі застосування щодо неточних вимірювальних приборів, якщо з великою точністю відтворюється еталонна величина. Ефект підвищення точності результатів вимірювань, що досягається при диференціальному методі, виявляється тим значнішим, чим ближче значення міри до істинного значення вимірюваної величини. У тому випадку, коли результуючий ефект впливу

Автоматизація і комп'ютерні технології

величин на прилад порівняння доводять до нуля, диференційний метод вимірювань перетворюється на нульовий. Очевидно, що в нульовому методі вимірів міра повинна бути змінною (регульованою), а прилад порівняння виконує функції індикатора рівності нулю результуючого впливу вимірюваної величини і міри.

Нульовий метод дозволяє отримати високі точності вимірювань і широко використовується, наприклад, при вимірах електричного опору мостом з повним його врівноваженням або постійної напруги компенсатором постійного струму.

Методом заміщення називається метод порівняння з мірою, в якому вимірювану величину заміщують відомою величиною, що відтворюється мірою. Метод заміщення можна розглядати як різновид диференціального або нульового методу. Але він відрізняється тим, що порівняння вимірюваної величини з мірою виробляється різночасно.

Метод збігів - це метод порівняння з мірою, в якому різниця між вимірюваною величиною і величиною, що відтворюється мірою, вимірюють, використовуючи збіг позначок шкал або періодичних сигналів.

Описані вище відмінності в методах порівняння вимірюваної величини з мірою знаходять своє відображення і в принципах побудови вимірювальних приладів.

Характерною особливістю приладів прямої дії є споживання енергії від об'єкта вимірювання (рис. 2, а). Однак це не виключає можливості застосування приладів прямої дії для вимірювання, наприклад, електричного опору або ємності, але для цього необхідно використовувати допоміжне джерело енергії.

Вимірювальний прилад порівняння призначений для безпосереднього порівняння вимірюваної величини з величиною, значення якої відомо (рис.2, б).

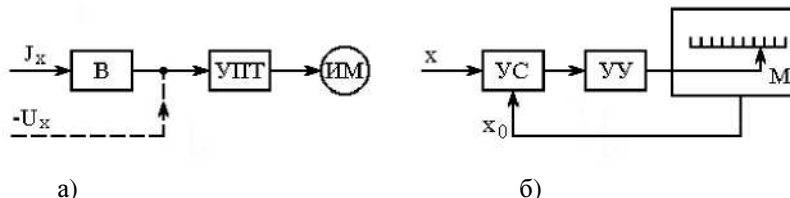


Рис. 2. Структурна схема вимірювального приладу: а) прямої дії; б) порівняння.

Величина X , що вимірюється, і однорідна з нею величина X_0 подаються на входи пристрою порівняння УС. Величина X_0 виходить від регулюємої міри M . Залежно від результату порівняння X з X_0 пристрій управління УУ впливає на міру M таким чином, щоб величина $|X - X_0|$ зменшувалася. Процес врівноваження закінчується, коли $X_0 = X$. При цьому значення вимірюваної величини відраховується за шкалою регульованої міри. Якщо у пристрої порівняння відбувається віднімання величин X і X_0 , то в даному приладі реалізується порівняння вимірюваної величини з мірою нульовим методом.

У вимірювальних приладах порівняння в колі зворотного зв'язку завжди формується фізична величина, однорідна з вимірюваною, яка подається на вхід приладу.

Слід зазначити, що порівняння вимірюваної величини з мірою в приладах порівняння може здійснюватися або одночасно (нульовий метод), або різночасно (метод заміщення).

Таким чином, наведена класифікація видів і методів вимірювань дозволяє не тільки систематизувати різноманітні вимірювання всіляких фізичних величин і тим самим полегшити підхід до вирішення конкретної вимірювальної задачі, та з загальних позицій підійти до розгляду структур і принципів дії різних вимірювальних приладів.

Для виміру параметрів елементів електричних кіл в залежності від об'єкта вимірювань, необхідної точності результату, діапазону робочих частот та інших умов застосовують різні методи. Найбільш поширеними є наступні методи вимірювання: вольтметра-амперметра, безпосередньої оцінки, мостовий, резонансний і дискретного рахунку.

Метод безпосередньої оцінки реалізується в приладах для вимірювання опору постійному струму - електромеханічних і електронних омметрах.

Вимірювання методом вольтметра-амперметра зводиться до вимірювання струму і напруги в колі з вимірюваним двополюсником і подальшого розрахунку його параметрів за законом Ома. Метод може бути використаний для вимірювання активного і повного опору резистору (рис. 1), ємності конденсатора і індуктивності котушки.

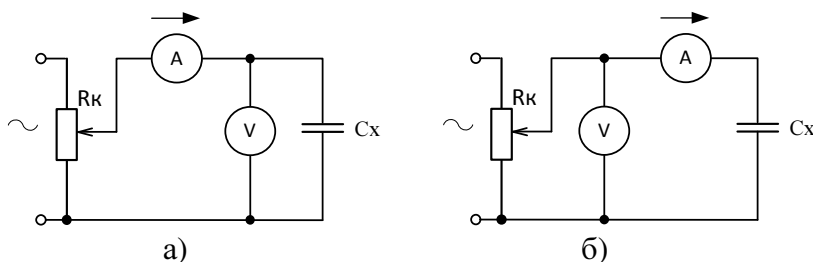


Рис. 3. Схема вимір ємності методом вольтметра-амперметра

Наприклад, при вимірюванні ємності конденсатору цим методом необхідно знати частоту джерела живлення f :

$$C_x = I / \omega U_c$$

$$\omega = 2\pi f,$$

де f - частота струму в ланцюзі; U_c - напруга, що вимірюється вольтметром.

Для вимірювання великих ємностей рекомендується схема, наведена на рис. 3,а; а малих ємностей - на рис. 3,б.

Для вимірювання дуже малих ємностей застосовують варіант методу вольтметра-амперметра (метод двох вольтметрів), схема якого наведена на рис. 4.

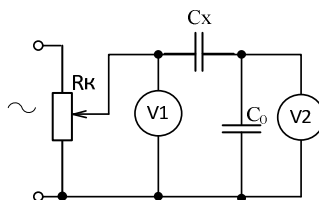


Рис. 4. Вимір дуже малих ємності методом двох вольтметрів

Напругу живлення U_1 вимірюється вольтметром V_1 . Вольтметр V_2 вимірює напругу на конденсаторі C_0 , ємність якого відома. Для зменшення похибки вимірювання необхідно виконати умову $C_0 \gg C_x$, тоді можна спростити вираз для C_x :

$$C_x = C_0 U_2 / U_1.$$

Метод двох вольтметрів дозволяє вимірювати ємності від часток пікофарад.

Вимірювання індуктивності котушки методом вольтметра-амперметра можливо, якщо її опір R_L значно менше реактивного опору X_L (рис. 5, а, б).

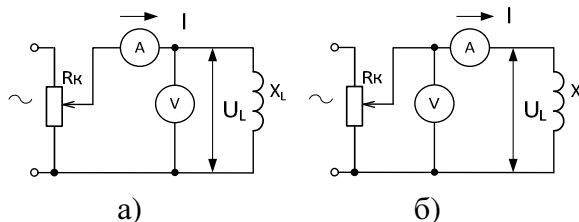


Рис. 5. Вимір індуктивностей котушок

Якщо потрібно отримати більш точний результат, то необхідно врахувати опір котушки R_L .

$$L = \frac{1}{\omega} \sqrt{\left(\frac{U_L}{I}\right)^2 - R_L^2}$$

Похибки вимірювання параметрів елементів ланцюгів методом вольтметра-амперметра на низьких частотах становлять 0,5 ... 10% і визначаються похибкою використовуваних приладів, а також наявністю паразитних параметрів. Похибки вимірювання зростають з збільшенням частоти.

Більш широко для вимірювання параметрів конденсаторів і індуктивностей застосовують рівноважені мости змінного струму, що дозволяють отримати малу похибку вимірювання до 1%. Живлення моста здійснюється від генератора, що працює на фіксованій частоті 400-1000 Гц.

На більш високих частотах на результат вимірювання починають впливати різні паразитні зв'язки.[5]

Резонансний метод вимірювання ґрунтується на визначенні резонансної частоти коливального контуру, складеного із зразкового і вимірюваного елементів (індуктивностей або ємностей). Цей метод застосовується для вимірювання індуктивностей і ємностей тільки на високій частоті, так як в області низьких частот резонансні явища проявляються недостатньо різко, що не дозволяє отримати високу точність вимірювання. Відомо кілька варіантів резонансного методу, на основі яких побудовані засоби вимірювання параметрів двополусників.

Як, відомо, резонансна частота коливального контуру визначається виразом:

$$f_0 = 1/2\pi\sqrt{LeCe}$$

де Le - еквівалентна індуктивність контуру; Ce - еквівалентна ємність контуру.

Величини еквівалентної ємності й індуктивності контуру визначаються параметрами зразкового й вимірюваного елемента, що входять у вимірювальний контур, так і величинам паразитних параметрів контура. Паразитні параметри вимірювального контуру є одним із джерел похибок вимірювань резонансними методами.

Найбільш простим резонансним методом вимірювання ємності конденсатора є метод, заснований на вимірюванні резонансної частоти вимірювального контуру, що складається з зразкової котушки індуктивності і вимірюваного конденсатора. Спрощена еквівалентна схема вимірювань для цього випадку представлена на рис.6. [6].

Вимірювальний контур налаштовуються на резонанс по максимальним показанням індикатора резонансу шляхом зміни частоти сигналу генератора високих частот ГВЧ.

Фіксується значення резонансної частоти f_0 .

$$Ce = 1/4\pi^2 f_0^2 Lзр,$$

де f_0 резонансна частота коливального контуру

$Lзр$ - індуктивність зразковою котушки.

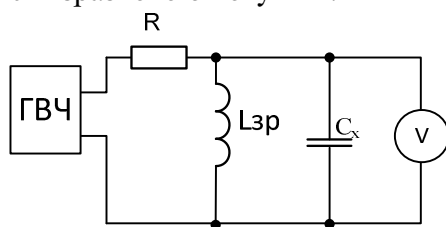


Рис. 6. Схема вимірювання ємності C_x

Еквівалентна індуктивність і еквівалентна ємність контуру $Le = Lзр$
 $Ce = Cзр$, тобто нехтується наявність паразитних параметрів контуру, що в цьому випадку є основним джерелом систематичної похибки.

Основними паразитними параметрами вимірювального контуру є: власна ємність зразковою котушки індуктивності - C_L , ємність монтажу

C_M , вхідна ємність індикатора резонансу - C_i , які включені паралельно вимірювального контуру.

Отже, еквівалентна ємність вимірювального контуру повинна визначатися як:

$$C_e = C_X + C_K + C_M + C_i = C_X - C_{II},$$

де C_{II} - паразитна ємність вимірювального контуру.

З попередніх формул отримуємо:

$$C_X = 1/4\pi^2 f_0^2 L_{zp} - C_n,$$

Величина власної ємності зразкової котушки є одним з її метрологічних параметрів і вказується на її корпусі (одиниці пФ). Ємність монтажу C_M визначається довжиною і взаємним розташуванням сполучних проводів та елементів вимірювального контуру (одиниці десятки пФ). Ємність вимірювача (C_i) визначається вхідною ємністю індикатора резонансу і ємністю з'єднувального кабелю (десятки-сотні пФ). Крім того, залишається паразитна індуктивність проводів, активні опори втрат в елементах і проводах контуру. Тому вимір паразитних параметрів (C_{II}), визначених на власній резонансній частоті вимірювального контуру ($f_{0вк}$), при вимірах на інших частотах є джерелом систематичної похибки вимірювань. Щоб ще більше зменшити систематичну похибку вимірювань застосовують метод заміщення.

Відповідно до методу заміщення вимірювання здійснюються в два етапи:

1. Вимірювальний контур, що складається з зразкової котушки вимірюваної ємності, налаштовують в резонанс по максимальним показаннями індикатора резонансу шляхом зміни частоти сигналу ГВЧ (рис.8).

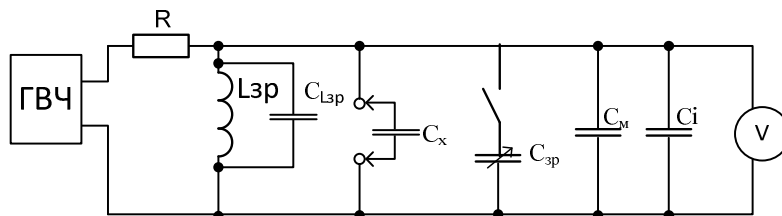


Рис. 7. Еквівалентна схема виміру ємності C_X методом заміщення

2. Не змінюючи налаштування частоти ГВЧ, відключають вимірювану ємність C_x і підключають замість неї до вимірювального контуру зразковий конденсатор змінної ємності $C_{зр}$. Налаштовують вимірювальний контур в резонанс з максимальним відхиленням індикатора резонансу шляхом зміни ємності зразкового конденсатора. За градуйованою шкалою зразкового конденсатора визначають резонансне значення $C_{зр}$. Т.к. частота генератора не змінна при обох вимірюваннях, то $C_x = C_{зр}$ і паразитні параметри вимірювального контуру не роблять впливу на точність вимірювань. При вимірюванні методом заміщення систематична похибка може бути викликана тим, що при відключенні C_x і підключенні конденсатора $C_{зр}$ змінюється ємність монтажу, що впливає на похибку вимірювання.

Цю похибку теж можна зменшити, застосовуючи метод компенсації.

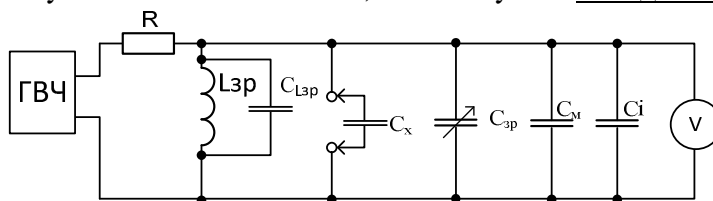


Рис. 8. Еквівалентна схема виміру ємності C_x методом компенсації

При вимірюванні ємності методом компенсації вимірювання виробляються в два етапи:

1. Вимірювальний контур, що складається з зразковою індуктивності $L_{зр}$, вимірюваної ємності C_x і зразкового конденсатора (рис.8) налаштовують в резонанс по максимальним показанням індикатора резонансу шляхом зміни частоти сигналу ГВЧ. При цьому значення ємності зразкового конденсатора $C_{зр1}$ повинно бути вибрано поблизу мінімального і визначено за градуйованою шкалою зразкового конденсатора.

2. Не міняючи частоти настроювання ГВЧ, відключають вимірювальну ємність C_x і налаштовують контур в резонанс на тій же частоті шляхом компенсації відключеною ємності C_x збільшенням ємності $C_{зр}$. Визначають резонансне значення $C_{зр2}$ по градуйованою шкалою зразкового конденсатора. Тому що частота генератора незмінна при обох вимірах, то $C_x = C_{зр2} - C_{зр1}$. І паразитні параметри вимірювального контуру не роблять впливу на результати вимірювань.

Найбільш точним з резонаторних методів вимірювання ємності конденсатора або індуктивності котушки є генераторний метод.

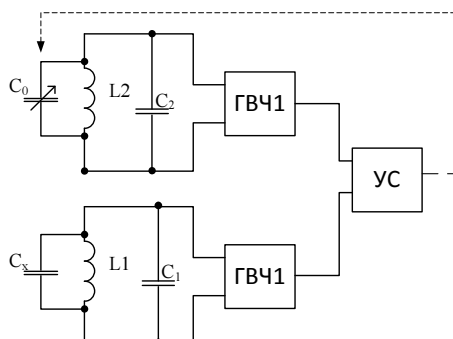


Рис. 9. Вимірювання ємності конденсатора генераторним методом

При включенні в контур ГВЧ2, вимірюваної ємності C_x , частота його зміниться. Частота генератора ГВЧ2 вимірюється шляхом порівнянні з частотою генератора ГВЧ1. Сигнали з обох генераторів подаються в пристрій порівняння УС, на виході якого є безліч комбінаційних частот, в тому числі і різницева. Якщо різниця частот генераторів дорівнює 0, то частоти генераторів однакові.

Вимірювання ємностей проводиться таким чином: вимірювана ємність C_x відключена, регулюванням ємності C_0 досягається рівність частот на виході обох генераторів, при цьому виконується співвідношення

$$L1C1=L2(C2+C0)$$

Потім в контур ГВЧ2 включається вимірювана ємність, його частота змінюється. Регулюванням C_0 встановлюється рівність частот обох генераторів і виконується співвідношення

$$L1(C1+C_x)=L2(C2+C0+\Delta C0).$$

З цього співвідношення випливає, що

$$C_x = \Delta C0.$$

Аналогічно проводять вимірювання індуктивності з використанням резонаторного методу.

Автоматизація і комп'ютерні технології

Висновки. При проектуванні сучасних пристроїв вимірювання електричних параметрів радіокомпонентів необхідно звертати увагу не тільки на точність вимірювання, а і на сталість цього параметру на різних частотах. Методи вольтметра-амперметра та мостові методи мають високу точність вимірювань (інколи до 0,1%), але похибки вимірювання зростають з збільшенням частоти. На похибку вимірювань методом коливального контуру впливають паразитні параметри контуру, які не враховуються в розрахунках. При вимірюванні ємності методом заміщення систематична похибка може бути викликана тим, що при відключенні одного конденсатора і підключенні іншого змінюється ємність монтажу, що впливає на точність вимірювання. Метод компенсації та генераторний метод є диференціальними методами, тому паразитні параметри вимірювального контуру не роблять впливу на результати вимірювань.

Резонаторні методи виміру ємності та індуктивності дозволяють: по-перше, отримати високу точність вимірювання; по-друге, виконати автоматизацію вимірювань, включивши до складу схеми пристрою мікроконтролер.

Література

1. Мелентьев, В.С. Информационно-измерительные системы контроля и испытаний энергообъектов на основе методов измерения и обработки мгновенных значений электрических сигналов: Дис. докт. техн. наук: 05.11.16. - Самара, 2006. – 357 с.
2. Царьков, А.А. Электромагнитный метод контроля расположения металлической арматуры опор контактной сети при смешанном армировании: Дис. канд. техн. наук: 05.22.07, М., 2010. – 87 с.
3. Оранский, П.П. Теоретические основы информационно-измерительной техники. 2-е изд., перераб. и доп. [Текст] / П.П. Оранский. – Киев: Вища школа. Головное узд-во, 1983. – 455с.
4. Дивин, А.Г. Методы и средства измерений, испытаний и контроля: учебное пособие. в 5 ч. [Текст] / А.Г. Дивин, С.В. Пономарев.- Тамбов: Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2011.Ч1 -104с.
5. Измерение электрических и неэлектрических величин: Учеб. Пособие для вузов. [Текст] / Н.Н. Евтихийев, Я.А.Купершмидтб ВьюФ. Папуловский, В.Н. Скугоров; Под общ. ред. Н.Н. Евтихьева. - М.: Энергоатомиздат, 1990. – 352.
6. В. Н. Седалищев. Методы и средства измерений электрических величин. Конспект лекции [Электронный ресурс] // URL: http://studopedia.ru/view_misi.php (дата: 5.02.2015)

Надійшла до редакції 22.12.2014

Автоматизація і комп'ютерні технології