

УДК 621.317.3:62-187.4



# НОВІ ТЕХНОЛОГІЇ ПРЕЦИЗІЙНОЇ ЕЛЕКТРОМЕТРІЇ

**М. Сурду**, доктор технічних наук, професор, заступник директора Інституту прецизійних вимірювань,  
**М. Мухаровський**, кандидат технічних наук, генеральний директор,  
**О. Ламеко**, директор Інституту прецизійних вимірювань,  
**О. Ахмадов**, кандидат технічних наук, завідувач лабораторії,  
**В. Копшин**, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник,  
**В. Гаврилкін**, завідувач відділу,  
ДП «Укрметртестстандарт»,  
**З. Монастирський**, доктор технічних наук, завідувач відділу,  
**Ф. Гриневич**, академік НАНУ, доктор технічних наук, головний науковий співробітник,  
Інститут Електродинаміки НАНУ,  
**О. Орнатський**, кандидат технічних наук, технічний директор,  
ТОВ «ОЛТЕСТ», м. Київ

*Подано новий підхід до підвищення точності вимірювань електричних величин, заснований на варіації коефіцієнта впливу джерел похибок на результат вимірювання. Кожна варіація супроводжується відповідним визначенням входної вимірюваної величини. Сукупність таких вимірюень описується системою рівнянь, розвязок якої дозволяє виключити вплив відповідних джерел похибок і отримати точний результат. Підхід не вимагає використання точних мір. Представлено точні ЗВТ, побудовані на основі варіаційного методу.*

*The new approach to improving the accuracy of electrical quantities measurements is described. The approach is based on realization of well known variations of influence coefficient of error sources on measurement result. During each error variation is fulfilled the evaluation of input measurand. These measurements are described by the system of equations. In such way the influence of correlated error sources on the measurement result is eliminated. The results of accurate variational device developments in different areas of electrical measurement are given.*

Електрика є однією з основ сучасної цивілізації. Тому вимірюванням електричних величин завжди приділялася велика увага, починаючи з перших досліджень у цій сфері. Роботи найбільших учених — засновників науки про електрику — пов'язані зі ство-

ренням методів і апаратури для таких вимірювань. Створенню методів точних вимірювань — мостових [1—8], заміщення й перестановок [9—14], структурних [15—18], тестових [19, 14], алгоритмічних [20—22, 14] тощо — і прецизійної апаратури для

вимірювань у цій сфері [23] присвячені зусилля багатьох відомих учених (J.C. Maxwell [24], M. Wien, S.H. Christie, C. Wheatstone, N. Tesla, H. Schering, Lord Kelvin of Largs [25], O. Heaviside, A.M. Thompson, D.G. Lampard [26, 27], B.D. Josephson [28, 29], K.V. Klitzing [30], R.D. Cutkosky [4], B.P. Kibble [3], інш.), компаній (Tesla, Guide Line, Measurement International, Hewlett Packard, Keithley Instruments, інших), провідних метрологічних лабораторій (NIST, BIPM, NPL, PTB, INRIM), Національних метрологічних інститутів (NMI) багатьох країн у минулому й сьогодні. У цілому ряді лабораторій світу існує унікальна прецизійна апаратура для точних вимірювань ємності, опору, індуктивності тощо. Однак і донині мало серійної апаратури для прецизійних вимірювань (можна вказати на автоматичні мости AH2500, AH2550 фірми Anden-Hagerling [5], апаратуру фірм Guide Line, Fluke, Keithley Instruments, Measurement International, General Radio та ін.), особливо у сфері імпедансометрії. Це пов'язано певною мірою зі значними габаритами, вагою й вартістю існуючої апаратури. Тому розроблення нових методів вимірювань, які дозволяють створити прецизійну малогабаритну апаратуру, залишається актуальним і сьогодні.

Нижче розглядається новий підхід до побудови малогабаритної прецизійної вимірювальної апаратури, заснований на варіації коефіцієнта впливу джерел похибок на результат вимірювання й виключенні впливу цих джерел на основі розв'язку системи рівнянь, що описують усю процедуру вимірювань. Раніше варіаційні методи широко розроблялися для урівноваження автоматичних мостів [31—33], тобто для підвищення точності урівноваження. Їх поширення на зниження похибки вимірювання власне вимірювальних ланцюгів вимагає глибокої комп'ютеризації як основи вимірювального процесу та розроблення нових підходів до побудови самих цих ланцюгів. Тому розвиток цього методу став можливим лише останнім часом, із широким поширенням процесорної й комп'ютерної техніки.

### ВАРИАЦІЙНИЙ МЕТОД ВИКЛЮЧЕННЯ ВПЛИВУ ДЖЕРЕЛ ПОХИБОК НА РЕЗУЛЬТАТ ВИМІРЕННЯ

Розглянемо вимірювальний ланцюг, в узагальненій формі представлений на рис. 1.

На його вхід надходить вимірювана величина  $X$ , а на її виході діє результат вимірювання  $Y$ . На цей ланцюг, окрім вхідної вимірюваної величини  $X$ , діють також дестабілізувальні фактори  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_i, \dots, \lambda_n$ . Звичайно, модель будь-якого вимірювального ланцюга добре вивчена, й джерела, що призводять до появилення похибки вимірювання, відомі.



Рис. 1

Припустимо, така модель описується рівнянням

$$Y = \varphi(X, \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_i, \dots, \lambda_n). \quad (1)$$

Дестабілізувальні фактори  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_i, \dots, \lambda_n$  призводять до появлення відповідного ряду похибок  $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_i, \dots, \delta_n$ .

Припустимо для простоти, що усі джерела похибок не корельовані між собою, а викликані ними похибки мають значення, розподілені за нормальним законом. Тоді, прийнявши до уваги, що похибка, обумовлена кінцевим порогом чутливості вимірювального ланцюга, дорівнює  $\delta_s$ , можемо записати, що загальна похибка вимірювання визначається формулою

$$\delta_c = \sqrt{\delta_s^2 + \sum_i (\delta_i)^2}. \quad (2)$$

Кожний дестабілізувальний фактор має свою фізичну природу й характеризується як відповідна фізична величина. Розмір цього фактора априорі невідомий. Тому його вплив на результат вимірювання не може бути ніяким способом визначено. При цьому кожний такий фактор впливає на результат вимірювання з деяким розмірним або безрозмірним коефіцієнтом зв'язку, який для лінійних ланцюгів є постійною величиною. Позначимо ці коефіцієнти через  $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_i, \dots, \rho_n$ . З урахуванням цього рівняння (1) трохи видозмінюються:

$$Y = \varphi(X, \lambda_1 \rho_1, \lambda_2 \rho_2, \dots, \lambda_i \rho_i, \dots, \lambda_n \rho_n). \quad (3)$$

Припустимо, що за час вимірювання як дестабілізувальні фактори  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_i, \dots, \lambda_n$ , так і самі коефіцієнти зв'язку  $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_i, \dots, \rho_n$  не змінюються. Як показують дослідження, у реальному вимірювальному ланцюзі завжди можна знайти спосіб, яким чином виконати адитивну або мультиплікативну варіацію  $v_1, v_2, \dots, v_i, \dots, v_n$  відповідного коефіцієнта зв'язку  $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_i, \dots, \rho_n$ . Рис. 2 ілюструє таку варіацію.

Виконаємо основне вимірювання  $Y_0$  за відсутності варіації будь-якого з коефіцієнтів впливу, після чого за чергою — варіацію кожного з коефіцієнтів впливу й проведемо при цьому відповідні вимірюння  $Y_1, Y_2, \dots, Y_i, \dots, Y_n$  вхідної фізичної величини  $X$ .

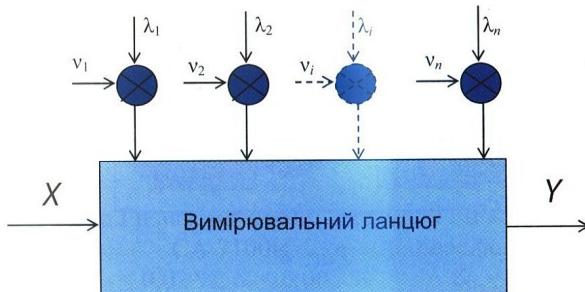


Рис. 2

Сукупність проведених вимірень описується системою рівнянь

$$\begin{aligned} Y_0 &= \phi_0(X; \lambda_1 \rho_1; \lambda_2 \rho_2; \dots; \lambda_i \rho_i; \dots; \lambda_n \rho_n) \\ Y_1 &= \phi_1(X; v_1; \lambda_1 \rho_1; \lambda_2 \rho_2; \dots; \lambda_i \rho_i; \dots; \lambda_n \rho_n) \\ &\dots \\ Y_n &= \phi_n(X; \lambda_1 \rho_1; \lambda_2 \rho_2; \dots; \lambda_i \rho_i; \dots; v_n; \lambda_n \rho_n) \end{aligned} \quad (4)$$

Легко бачити, що наведена система рівнянь дозволяє знайти істинне значення результату вимірювання, що не залежить від впливу дестабілізувальних факторів  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_i, \dots, \lambda_n$ .

Очевидно, що виключити вплив дестабілізувальних факторів можна гранично лише з точністю, обумовленою чутливістю  $\delta_s$  вимірювального ланцюга й похибкою виконання варіації  $\delta_{vi}$ . Відповідний аналіз показує, що загальна похибка вимірювання у разі використання варіаційного методу визначається рівнянням

$$\delta_c = \sqrt{\delta_s^2 + \sum_i (\delta_i + \delta_s)(\delta_{vi} + \delta_s)}. \quad (5)$$

Формула (5) демонструє, що у разі використання варіаційного методу корекції похибки вплив кожної зі складових похибки вимірювання зменшується у рази, величиною у зворотну похибці варіації. Припустимо, наприклад, що якась зі складових похибки вимірювання має розмір  $10^{-3}$ , а похибка формування варіаційного впливу становить також  $10^{-3}$ . Тоді сумарний вплив розглянутої складової похибки не перевищить  $10^{-6}$ . Підкреслимо, що при цьому допустима похибка формування варіаційного впливу становить лише  $10^{-3}$ .

У той же час рівняння (5) показує, що внесок похибки від нечутливості у разі використання підходу, що розглядається, помітно зростає. Припустимо, наприклад, що у вимірювальному ланцюзі є  $n$  джерел похибок, а величина  $\delta_i \delta_{vi} \ll \delta_s$ . Тоді, як неважко бачити з (5), вплив похибки вимірювального ланцюга, обумовленої кінцевим порогом чутливості, зростає в  $\sqrt{n}$  разів.

Варіаційний метод корекції вимагає проведення  $n$  вимірень замість одного. Очевидно, що за інших

рівних умов це означає, що час вимірювання за неприятливого випадку зросте в  $n$  разів:

$$t_c = \sum_n t_i. \quad (6)$$

Отже, чим точніше необхідно виконати вимірювання, тим більше число джерел похибок необхідно врахувати й скорегувати. При цьому тим сильніше зростають середньоквадратичні відхилення вимірювань і загальний час вимірювання.

Зазначені два недоліки варіаційного методу можна перебороти різними шляхами.

Далі зупинимося лише на короткому описанні шляхів подолання зазначених вище недоліків, які базуються на класифікації тезауруса похибок вимірювального ланцюга. Нижче розглядаються два види класифікації: тимчасова й просторова.

#### Тимчасова класифікація

Аналіз тезауруса похибок вимірювального ланцюга демонструє, що джерела похибок мають різну тимчасову стабільність. При цьому інтервали, на яких джерело похибки можна вважати стабільним, коливаються у мільйони разів (від одиниць років до секунд). Ясно, що період варіаційної корекції похибки раціонально корегувати з характерним інтервалом, протягом якого дане джерело можна вважати стабільним. Об'єднаємо джерела похибок, що мають подібні періоди нестабільності, у кластери. Тоді для кожного кластера похибок можна проводити варіаційне калібрування з деяким періодом, меншим від характерного інтервалу нестабільності даного кластера. Така класифікація похибок вимірювального ланцюга ілюструється рис. 3.

На цьому як приклад виконано класифікацію усього тезауруса похибок на три кластери  $T_1$ ,  $T_2$  і  $T_3$ . Перший передбачає об'єднання джерел похибок із характерним періодом нестабільності у місяці й більшими. Другий об'єднує джерела похибок із характерним періодом нестабільності у годині. Третій об'єднує похибки, розмір яких залежить від параметрів об'єкта вимірювання, і тому вимагають калібрування у процесі кожного вимірювання. Варіаційне калібрування проводиться за кожним кластером з періодом, характерним для даного кластера. У цьому

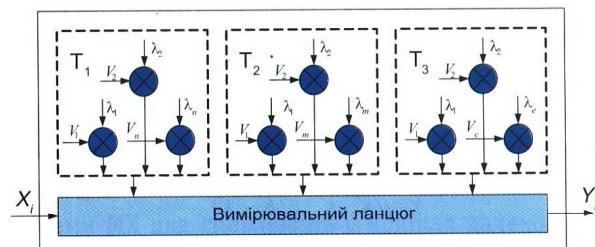


Рис. 3

випадку весь процес варіаційного калібрування описується трьома системами рівнянь (6a, 6b, 6c):

$$\begin{cases} Y_{10} = \varphi(X; \delta_{11}, \dots, \delta_{1n}) \\ Y_{11} = \varphi(X; \delta_{11}; v_{11}, \dots, \delta_{2n}) \\ \dots \\ Y_{1n} = \varphi(X; \delta_{11}, \dots, v_{1n}, \delta_{1n}) \end{cases} \quad (6a)$$

$$\begin{cases} Y_{20} = \varphi(X; \delta_{21}, \dots, \delta_{2m}) \\ Y_{21} = \varphi(X; \delta_{21}; v_{21}, \dots, \delta_{2m}) \\ \dots \\ Y_{2m} = \varphi(X; \delta_{21}, \dots, v_{2m}, \delta_{2m}) \end{cases} \quad (6b)$$

$$\begin{cases} Y_{30} = \varphi(X; \delta_{31}, \dots, \delta_{3l}) \\ Y_{31} = \varphi(X; \delta_{31}; v_{31}, \dots, \delta_{3l}) \\ \dots \\ Y_{3l} = \varphi(X; \delta_{31}, \dots, v_{3l}, \delta_{3l}) \end{cases} \quad (6c)$$

За такого підходу похибки, значення яких визначено у процесі калібрування у рамках кластера з більш довгим інтервалом характерної нестабільноти, входять до системи рівнянь, що описує кластер із більш коротким інтервалом нестабільноті, як постійні параметри.

Виграш у часі вимірювання у разі тимчасової кластеризації визначається двома факторами:

- кількістю кластерів;
- розподілом джерел похибок за кластерами, зокрема, кількістю джерел похибок у кластері з найкоротшим періодом варіаційного калібрування.

Тимчасова кластеризація дає можливість знизити час варіаційного калібрування в ряді випадків у десятки разів. Однак зростання впливу похибки, обумовленої кінцевим порогом чутливості вимірювального ланцюга, як і раніше, визначається рівнянням (5).

### Просторова кластеризація

Розрізняють два види просторової кластеризації: чотириполюсну й контурну.

#### 1. Чотириполюсна кластеризація

У разі чотириполюсної кластеризації виділяють частини вимірювального ланцюга, що об'єднують ряд джерел похибок, і представляють ці ділянки у вигляді чотириполюсників із коефіцієнтами передавання  $K_1 \dots K_n$  (рис. 4). Тоді рівняння перетворення вимірювального ланцюга можна представити у вигляді функції, аргументами якої виступають коефіцієнти передавання чотириполюсників (формула (7)). Очевидно, що останніх набагато менше, ніж джерел похибок.

$$Y = f(K_1, K_2, \dots, K_n, X). \quad (7)$$

Варіаційне калібрування у разі чотириполюсної кластеризації полягає у виконанні основного ви-



Рис. 4

мрення й почергової відомої варіації коефіцієнтів передавання кожного з чотириполюсників. Кожна варіація супроводжується відповідним вимірюнням вхідної величини.

Сукупність описаних вимірень описується відповідною системою рівнянь:

$$\begin{aligned} Y &= f(K_1, K_2, K_3, K_n, X); \\ Y_1 &= f(K_1, V_1, K_2, K_3, K_n, X); \\ &\dots \\ Y_n &= f(K_1, K_2, K_3, K_n, V_n, X). \end{aligned} \quad (8)$$

Розв'язок наведеної системи рівнянь дозволяє отримати дійсне значення вимірюваної величини й виключити вплив відповідних дестабілізувальних факторів. Очевидно, що через меншу кількість вимірень у разі чотириполюсної кластеризації різко зменшується час вимірювання й знижується нагромадження випадкової складової похиби вимірювання. Зменшення часу вимірювання у разі чотириполюсної кластеризації порівняно з простим варіаційним виключенням похибок можна оцінити як відношення числа джерел похибок до числа чотириполюсників. Зниження випадкової складової похиби вимірювання становить число, що дорівнює кореню квадратному із величини цього відношення.

#### 2. Контуруна кластеризація

Вимірювальний ланцюг може розглядатися як сукупність окремих взаємопов'язаних контурів  $L_1, L_2, \dots, L_i$ , кожний з яких має вихідний вимірюваний сигнал  $Y_1, Y_2, \dots, Y_i$ . Кожний із названих контурів включає сукупність джерел похибок. Структуру вимірювального ланцюга у разі такої кластеризації наведено на рис. 5.

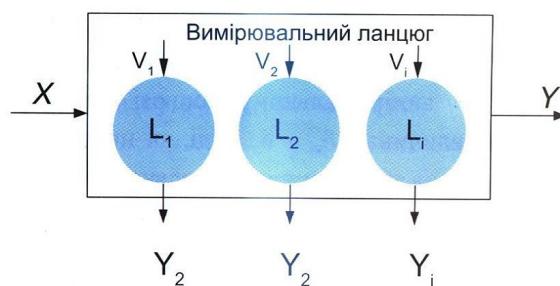


Рис. 5



Рис. 6. Серійна робоча апаратура

У разі контурної класифікації одночасно вимірюються основний вихідний сигнал вимірювального ланцюга й вихідні сигнали контурів. Після цього у кожному з контурів проводиться варіація сигналу нерівноваги й вимірюється його нове значення. Сумісність усіх цих вимірювань описується системою рівнянь (9).

$$\begin{aligned} Y &= f(L_1, L_2, L_3, X); \\ Y_1 &= \varphi(L_1, V_1, X); \\ Y_2 &= \Psi(L_2, V_2, X); \\ Y_i &= Q(L_i, V_i, X). \end{aligned} \quad (9)$$

Наявність взаємозв'язку між контурами вимірювального ланцюга призводить до ускладнення системи рівнянь (8), однак система, як і раніше, дозволяє визначити істинне значення вимірюваної величини.

Очевидно, що одночасне вимірювання ряду сигналів нерівноваги ускладнює апаратуру. Однак та-кож очевидно, що при цьому суттєво зростає швидкодія процесу вимірювання. Ясно також, що сумарна випадкова похибка визначається сумою випадкових похібок вимірювання в окремих контурах.

Відзначимо, що просторова класифікація вимагає специфічної побудови вимірювального ланцюга, що передбачає можливість поділу вимірювального ланцюга на чотириполюсники або контури з відповідними вихідними сигналами.

У будь-якому випадку варіаційного калібрування, окрім ретельного моделювання вимірювального ланцюга, що дозволяє побудувати коректну залежність результату вимірювання від відповідних джерел похібок, необхідно розробляти способи уведення варіації коефіцієнта впливу відповідного джерела

похібки на результат вимірювання. Відзначимо також, що похибка варіації в будь-якому разі не повинна перевищувати величини  $\delta_{vi} \leq \delta_c / \delta_i$ .

#### ПРЕЦІЗІЙНА ВИМІРЮВАЛЬНА АПАРАТУРА

Описані вище способи варіаційного калібрування протягом останніх 15 років використовувалися для побудови різноманітної прецизійної вимірювальної апаратури. Створена апаратура призначена для вимірювань параметрів імпедансу, температури, фізико-хімічних, в енергетиці тощо. За класами точності ця апаратура призначена як для робочих (0,1%), так і для еталонних (0,000001%) вимірювань. Деякі з розроблених на базі варіаційного калібрування ЗВТ коротко представлено на рис. 6—8.

#### ВИСНОВКИ

Наведено велику кількість створених пристріїв, які за своїми метрологічними характеристиками не поступаються кращим зарубіжним розробкам. Разом із тим, створена апаратура має значно менші габарити, вагу й ціну. Це стосується апаратури як для вимірювання параметрів імпедансу і магнітних полів, так і для вимірювань в енергетиці, температурних і т. ін.

Переважна частина описаної апаратури пройшла Державні випробування, внесена до реєстрів країн СНД, випускається серійно, поставляється у країни СНД і далекого зарубіжжя. Широка географія постачання такої апаратури обумовлена її доступною ціною для споживачів у країнах СНД та її привабливими МХ для споживачів у країнах далекого зарубіжжя. Невеликі габарити й вага надають їй зручності у всьому спектрі застосувань.



Універсальна вимірювальна система  
СА 320

$\delta_0 \leq 0,002\%$ ;  $\delta_s \leq 0,0002\%$



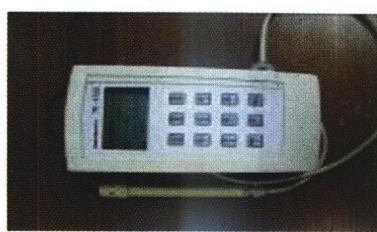
Вимірювач емності «Сибірячка»  
 $\delta_0 \leq 0,0001\%$ ;  $\delta_s \leq 0,00001\%$



Компаратор СА 507  
 $\delta_0 \leq 0,001\%$ ;  $\delta_s \leq 0,0001\%$



Високовольтний міст СА 7100М  
 $\delta_0 \leq 0,001\%$ ;  $\delta_s \leq 0,0001\%$



Вимірювач електропровідності й температури  
ТК 4100

$\delta_0 \leq 0,02\%$ ;  $\delta_s \leq 0,001\%$



Прецизійний компаратор імпедансів  
«Гладіатор»

$\delta_0 \leq 0,0001\%$ ;  $\delta_s \leq 0,000001\%$



Багатоканальний компаратор емності «Султан»  
 $\delta_0 \leq 0,0001\%$ ;  $\delta_s \leq 0,00001\%$



Еталонний термометричний міст СА 300  
 $\delta_0 \leq 0,00002\%$ ;  $\delta_s \leq 0,000002\%$

Rис. 7. Серійна еталонна апаратура



Державний еталон індуктивності й  
тангенса кута втрат



Еталон коефіцієнта передавання великих струмів



Державний еталон емності й тангенса  
кута втрат



Державний еталон РН



Державний еталон  
питомої електричної  
проводності розчинів

Rис. 8. Еталони фізичних величин

Разом із тим, варіаційне калібрування сьогодні лише починає використовуватися для створення прецизійної вимірювальної апаратури. Розширення сфери застосування цього методу, його більш глибоке теоретичне обґрунтування, теоретична й практична адаптація для цілого ряду видів вимірювань і конкретної апаратури є предметом подальших досліджень.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Карапеев К.Б. Специальные методы электрических измерений. — М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. — 344 с.
2. Фундаментальные проблемы теории точности / Под ред. В.П. Булатова, И.Г. Фридлендера. — СПб.: Наука, 2001.
3. Kibble B.P., Rainer G.H. Coaxial alternative current bridges, Briston; Pdam Hilder Ltd., 1984. — 203 p.
4. Cutkosky R.D. An automatic high — precision audio frequency capacitance bridge, IEEE transactions on instrumentation and measurement, vol. IM-34, September, 1985 — pp. 383—389.
5. Anden-Hagerling, AN2500, Instruction Manual, 1 kHz automatic capacitance bridge.
6. B. Hague. Alternating Current Bridge Methods, Isaac Pitman amp Sons, London, 1923. — 313 p.
7. Scroggie, M.G. The Genius of A.D. Blumlien, Wireless World, Sept. 1960 — pp. 451—456.
8. Blumlein, A.D. British Patent No. 323.037. Alternating Current Bridge.
9. Байда Л.И., Добротворский Н.С., Душин Е.М. и др. Электрические измерения: Учебник для вузов / Под ред. А.В. Фремке и Е.М. Душкина. — 5-е изд., перераб. и доп. — Л.: Энергия. Ленингр. отд-ние, 1980. — 392 с., ил.
10. Орнатский П.П. Автоматические измерения и приборы. — К.: Вища школа. Головное изд-во, 1986. — 504 с.
11. Нефедов В.И. Метрология и радиоизмерения. — М.: Высшая школа, 2006. — 526 с.
12. Ушаков И.Е., Шишкун И.Ф. Прикладная метрология: Учебник для вузов. Изд. 4-е, перераб. и доп. — СПб.: СЗТУ, 2002. — 116 с.
13. Методы электрических измерений: Учеб. пособие / Под редакцией Э.И. Цветкова. — Л.: Энергоатомиздат, 1990.
14. Розенберг В.Я. Введение в теорию точности измерительных систем. — М.: Сов. радио, 1975.
15. Туз Ю.М. Структурные методы повышения точности измерительных устройств. Издательское объединение «Вища школа», 1976. — 266 с.
16. Петров Б.Н. Принцип инвариантности в измерительной технике. — М.: Наука, 1976.
17. Кузнецов Е.Н. Структурные методы повышения точности измерения параметров электрических цепей: Дисс. д-ра техн. наук: 05.11.01. — Пенза, 2007. — 352 с.
18. Арбузов В.П. Структурные методы повышения точности измерительных цепей емкостных и индуктивных датчиков: Автореф. дисс... д-ра техн. наук: 05.11.01. — Пенза, 2009.
19. Бромберг Э.М., Куликовский К.Л. Тестовые методы повышения точности измерений. — М.: Энергия, 1978. — 176 с.
20. Земельман М.А. Автоматическая коррекция погрешностей измерительных устройств. — М.: Издательство стандартов, 1972.
21. Алиев Т.М., Тер-Хачатуров А.А. Измерительные устройства: Учебник для вузов. — М.: Высшая школа, 1991.
22. Шляндін В.М. Цифровые измерительные устройства: Учебник для вузов. — М.: Высшая школа, 1981.
23. Rein Laaneots and Olev Mathiesen. An Introduction to Metrology: TUT Press, Tallinn 2006. — 272 p.
24. James Clerk Maxwell. A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field. Royal Society Transactions, vol. CLV, 1865, p. 459.
25. Campbell, M.A. and Childs, E.C. Measurements of Inductance, Capacitance and Frequency, Van Nostrand 1935, p. 342, refers to Thomson, W. (Lord Kelvin), Soc Tel Eng J., vol. 1, p. 397 (1873).
26. A.M. Thompson. The Precise Measurement of Small Capacitances, IRE Trans Instr., 1958.
27. Thompson, A.M. and Lampard, D.G. A New Theorem in Electrostatics and Its Application to Calculable Standards of Capacitance, Nature, vol. 166, p. 888 (1956).
28. Josephson, B.D. (1974). The discovery of tunnelling supercurrents // Rev. Mod. Phys. 46 (2): 251–254. doi: 10.1103 / Rev. Mod. Phys.46.251.
29. Barone, A.; Paterno, G. (1982). Physics and Applications of the Josephson Effect. New York: John Wiley & Sons. ISBN 0471014699.
30. K.v. Klitzing, G. Dorda, M. Pepper. New Method for High-Accuracy Determination of the Fine-Structure Constant Based on Quantized Hall Resistance. Phys. Rev. Lett. 45, 494, 1980.
31. Гриневич Ф.Б. и др. Трансформаторные измерительные мости: Энергия, 1970. — 280 с.
32. Гриневич Ф.Б., Сурду М.Н. Высокоточные вариационные измерительные системы переменного тока. — К.: Наукова думка, 1989.
33. Гриневич Ф.Б. Автоматические мости переменного тока. — Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1964. — 215 с. №