

- Логарифмический аналого-цифровой преобразователь/ В.А.Тесленко, В.Д.Циделко // Открытия. Изобрет. 1976. №1. 14. А.с. 512475 СССР. Логарифмический преобразователь/ В.Д.Циделко, В.А.Тесленко// Открытия. Изобрет. 1976. №16. 15. А.с. 516050 СССР. Логарифмический функциональный преобразователь/ В.Д.Циделко // Открытия. Изобрет. 1976. №20. 16. А.с. 547785 СССР. Логарифмический аналого-цифровой преобразователь/ В.А.Тесленко, В.Д.Циделко// Открытия. Изобрет. 1977. №7. 17. Мичуда З.Р. Интегрирующий логарифмичний АЦП// Вісник ДУ "Львівська політехніка". 1998. №348. С.17-23. 18. А.с. 949663 СССР. Способ определения логарифма/ З.Р.Мичуда, В.Б.Дудыкевич // Открытия. Изобрет. 1982. №29. 19. А.с. 1157551 СССР. Логарифмический аналого-цифровой преобразователь/ В.Б.Дудыкевич, З.Р.Мичуда, В.И.Нечепоренко// Открытия. Изобрет. 1985. №19. 20. С.С.Lefas. A serial charge redistribution logarithmic A/D converter // Int. Journal of Circuit Theory and Applications. Vol.17, 1989, P.47-54. 21. Муляк Я. Схемы на операционных усилителях с переключаемыми конденсаторами: Пер. с польск. М., 1992. 22. Mychuda Z.R., Piskozub A.Z A charge redistribution analog-to-digital converters modelling // International Workshop on ADC MODELLING. PROCEEDINGS. House of Scientists, Smolenice Castle, Slovak Republic, May 7-9, 1996. P.100-105. 23. А.с. 1425726 СССР. Логарифмический аналого-цифровой преобразователь/ З.Р.Мичуда, В.П.Лукашевич // Открытия. Изобрет. 1988. №35. 24. Мичуда З.Р., Куземко О.З. Логарифмичний АЦП з перерозподілом заряду// Вісник ДУ "Львівська політехніка". 1995, №292, С.75-80. 25. Мичуда З.Р. Підвищення точності та швидкодії послідовних логарифмічних АЦП з перерозподілом заряду// Книга за матеріалами 4-ї міжнародної НТК "Контроль і управління в технічних системах". У 3-х томах. Т.2. Вінниця, 1997. С.131-136. 26. А.с.1382253 СССР. Логарифмический аналого-цифровой преобразователь / З.Р. Мичуда// 1987. 27. Мичуда З.Р. Логарифмічний АЦП із ступінчато наростаючою розгорткою// Вісник ДУ "Львівська політехніка". 1998, №324, С.106-110. 28. А.с. 1501097 СССР. Логарифмический аналого-цифровой преобразователь/ З.Р.Мичуда, Н.В.Яворский// Открытия. Изобрет. 1989. №30. 29. Мичуда З.Р. Логарифмічний АЦП із проміжним перетворенням напруга-струм // Вісник ДУ "Львівська політехніка". 1998, №324, С.101-106. 30. Влах Г.І., Мичуда З.Р. Компенсаційний перетворювач напруга-струм // Вісник ДУ "Львівська політехніка". 1996. №305. С.53-56. 31. А.с. 1429136 СССР. Логарифмический аналого-цифровой преобразователь/ З.Р.Мичуда, Н.В.Яворский// Открытия. Изобрет. 1988. №37. 32. Мичуда З.Р. Порозрядний логарифмічний аналого-цифровий перетворювач// Вимірювальна техніка та метрологія. 1998. №53. С.114-118. 33. Мичуда З.Р., Куземко О.З. Паралельний логарифмічний аналого-цифровий перетворювач// Праці 3-ї української конференції з автоматичного керування "Автоматика-96". Севастополь, 1996. Т.1. С.211. 34. Заявка 96114193 Україна. Спосіб логарифмічного аналого-цифрового перетворення/ З.Р.Мичуда// Бюл. ПВ. 1997. №3.

УДК 621.317.73

## ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПАСИВНИХ ВЕЛИЧИН З ВИКОРИСТАННЯМ ПРИНЦИПУ ДВОКАНАЛЬНОСТІ

© Євген Походило, 2000

Національний університет "Львівська політехніка", кафедра "Метрологія, стандартизація та сертифікація", вул. С. Бандери, 12, 79013, Львів, Україна

*Розглядається узагальнений підхід до проблеми вимірювання параметрів пасивних величин. Зроблено спробу показати спорідненість мостового методу вимірювання з методом прямого перетворення параметрів пасивних величин в напругу постійного струму.*

*Рассматривается обобщенный подход к проблеме измерения параметров пассивных величин. Показано общность мостового метода измерения с методом прямого преобразования пассивных величин в напряжение постоянного тока.*

*It is considering a generalized approach to the problem of passive parameters measuring. It is made an effort to show a community of bridge method of measuring and method of direct transformation of passive parameters in direct current voltage.*

## 1. Вступ

Використання принципу двоканальності у вимірювальному експерименті, як відомо [1,2], покращує метрологічні та експлуатаційні характеристики засобів вимірювальної техніки. Досягається це завдяки забезпеченню інваріантності результату вимірювання до багатьох впливових величин, які однаково діють на вимірювальний та опорний канали. Це, зокрема, величини навколишнього середовища (температура, тиск, вологість тощо) [3], параметри тестового сигналу у вимірювальних схемах CLR-метрів [4], конструктивні параметри імітансних первинних перетворювачів [5]. Результатом вимірювання таких засобів є відношення сигналів каналів. Рівень інваріантності в практичній реалізації принципу двоканальності залежить, в основному, від ідентичності характеристик вимірювального і опорного каналів. Пристрої, які здійснюють ділення двох напруг постійного струму, мають досить високу точність, а тому використання у вимірювальній техніці принципу двоканальності є актуальним. Автором зроблено спробу узагальненого підходу до використання принципу двоканальності в засобах вимірювання параметрів пасивних комплексних величин (імітансу), що реалізують нульовий метод та метод з прямим перетворенням.

## 2. Мости

Традиційними та найдосконалішими за метрологічними характеристиками засобами вимірювання пасивних величин, зокрема CLR-параметрів, як відомо, є мости, які реалізують нульовий метод [6,7]. Особливість реалізації методу мостом полягає в порівнянні пасивних величин, активні величини (напруга на вершинах моста в діагоналі індикатора) при цьому використовуються тільки для керування процесом вимірювання (зрівноваження). Такий варіант побудови вимірювального засобу можна розглядати як найбільш вдалий з погляду простоти реалізації принципу двоканальності, що забезпечує високі метрологічні характеристики. Однак сам процес зрівноваження потребує великої кількості зразкових мір. Узагальнена структурна схема як двоканальна структура, яка реалізує нульовий метод мостом, показана на рис.1.

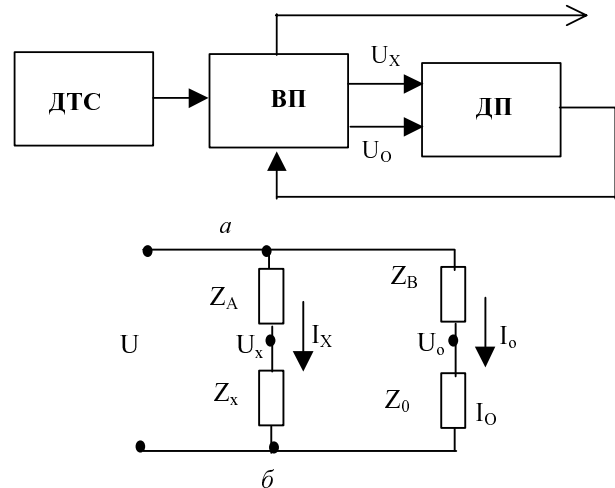


Рис. 1. Схеми, що реалізують мостовий метод вимірювання параметрів пасивних величин

Вона містить джерело тестового сигналу ДТС, векторний перетворювач ВП та дільний пристрій ДП. ВП є різновидом мостової схеми, утвореної з пасивних елементів, і формує на її вершинах під дією тестового сигналу фіксованого рівня і частоти інформаційну  $U_x$  та опорну  $U_o$  напруги. Теоретично, виходячи з принципу двоканальності, ДП повинен фіксувати відношення напруг обох каналів перетворення. Однак на практиці (в мостах) така операція реалізована через вимірювання різниці між ними (оскільки її стало легко здійснювати з появою самої мостової схеми), формуючи відповідний сигнал керування на зміну значень зразкових елементів ВП до досягнення нульового рівня між напругами. У такому випадку, як відомо, (для чотириплечого моста з пасивними елементами, рис. 1, б), напруги на вершинах моста

$$U_x = \frac{U}{Z_A + Z_x} Z_x; \quad U_o = \frac{U}{Z_B + Z_o}, \quad (1)$$

$$\text{де: } \frac{U}{Z_A + Z_x} = I_x, \quad \frac{U}{Z_B + Z_o} = I_o,$$

тоді

$$U_x = I_x Z_x, \quad U_o = I_o Z_o \quad (2)$$

За умовами рівноваги мостової схеми  $U_x/U_o = 1$  ( $U_x - U_o = 0$ ) з (1) отримуємо

$$Z_x = Z_o \frac{Z_A}{Z_B}, \quad (3)$$

а при  $I_x = I_o$  з (2) одержуємо частковий випадок, коли

$$Z_x = Z_o,$$

де  $Z_o$  – плече порівняння;  $Z_A/Z_B$  – плечі відношення.

Отже, в процесі зрівноваження мостової схеми беруть участь три зразкові елементи (міри опору) – плече порівняння і плечі відношення, значення яких повинні змінюватися в широких межах.

### 3. Вимірювачі з прямим перетворенням

Значно простішими з погляду практичної реалізації є засоби вимірювання пасивних величин, побудовані на немостовому методі [1,4,8,9,10]. Одним із таких є метод з прямим перетворенням пасивної величини в активну, а саме в напругу. На відміну від мостового методу, тут активні величини безпосередньо беруть участь у вимірюванні. Формуються вони у вигляді напруг постійного струму в результаті перетворення комплексних величин, пропорційних до спаду напруги на об'єкті вимірювання та струмові через нього. Відношення напруг визначає значення параметра пасивної величини. Здійснюється таке перетворення додатковими перетворювачами ПВС<sub>1</sub>, ПВС<sub>2</sub>, вихідними сигналами (інформативним і опорним) яких є напруги постійного струму. Узагальнену структуру засобу вимірювання, яка реалізує такий метод з використанням принципу двоканальності, наведено на рис.2.

З появою інтегруючих аналого-цифрових перетворювачів АЦП з двотактним інтегруванням стало можливим досить легко здійснювати операцію ділення. Останнім часом АЦП широко використовують для вимірювання пасивних величин, реалізуючи принцип двоканальності [1, 11]. Як відомо [10], для них справедлива рівність

$$\frac{1}{\tau} \int_0^{T_0} U_x dt - \frac{1}{\tau} \int_0^{T_x} U_0 dt = 0,$$

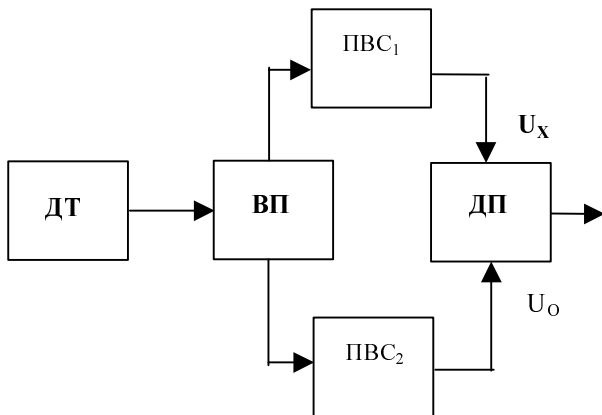


Рис. 2. Структурна схема, яка реалізує метод з прямим перетворенням

з якої отримують

$$\frac{U_x}{U_0} = \frac{T_x}{T_0} \quad (4)$$

де  $U_x, U_0$  – відповідно вимірювана та опорна напруги,  $T_0, T_x$  – відповідно вимірюваний та опорний інтервали інтегрування,  $\tau = RC$  – параметри інтегратора.

Тобто АЦП з двотактним інтегруванням здійснює операцію ділення двох напруг постійного струму, поданих в аналоговому вигляді і доведених до його входів. Це можна розглядати як завершальну операцію процесу вимірювання пасивних величин зазначеним вище методом з використанням принципу двоканальності. На думку автора, це також є реалізація нульового методу, але здійснюється вона не мостом, а вимірювачем з прямим перетворенням. Для спрощення порівняння моста з вимірювачем прямого перетворення необхідно прийняти деякі умови, а саме:

- об'єктом вимірювання є комплексний опір  $Z_x$  або комплексна провідність  $Y_x$ ;
- об'єктом порівняння (зразковим) відповідно приймається  $Z_0$  та  $Y_0$ ;
- до об'єктів прикладено напругу фіксованого рівня  $U$  та частоти  $\omega$ ;
- перетворення векторних величин в скалярні здійснюється ідеальними засобами.

Пропустивши струм через об'єкт вимірювання та порівняння, отримуємо напругу  $U_x$  на імітансі і напругу  $U_0$  на зразковому елементі, які описуються залежностями

$$U_x = I_x Z_x; U_0 = I_0 Z_0; U_x = \frac{I_x}{Y_x}; U_0 = \frac{I_0}{Y_0},$$

а з урахуванням (4) отримуємо

$$Z_x = \frac{I_0}{I_x} \frac{T_x}{T_0} Z_0; Y_x = \frac{I_x}{I_0} \frac{T_0}{T_x} Y_0 \quad (5)$$

Забезпечивши рівність струмів  $I_x=I_0$ , вираз (5) запишемо як

$$Z_x = Z_0 \frac{T_x}{T_0}; Y_x = Y_0 \frac{T_0}{T_x} \quad (6)$$

З (6) виходить, що комплексний опір  $Z_x$  прямо пропорційний до інтервалу  $T_x$  при  $\frac{Z_0}{T_0} = \text{const}$ , а провідність  $Y_x$  – обернено пропорційна до інтервалу  $T_x$  при  $Y_0 T_0 = \text{const}$ .

Отже, для забезпечення лінійної залежності в обох випадках необхідно змінювати порядок інтегрування в режимі вимірювання провідності або форму-

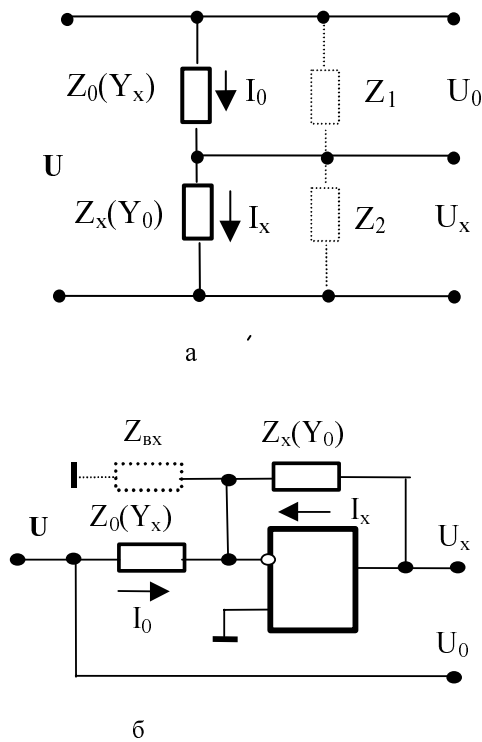


Рис. 3. Схеми векторних перетворювачів

мувати інформативну напругу  $U_x$ , яка прямо пропорційна до  $Y_x$ . Так і робиться у перетворювачах, що здійснюють перетворення  $Z_x(Y_x)$  в  $U_x$  [12].

Розглянемо варіант забезпечення рівності струмів  $I_x=I_0$  на відомих прикладах пасивного (рис.3,а) і активного (рис.3,б) подільників напруги, використовуваних як векторні перетворювачі [11].

Відповідно до наведених схем напруги при  $I_x=I_0$  (вимірювання  $Z_x$ )

$$U_x = \frac{U}{Z_x + Z_0} Z_x; \quad U_0 = \frac{U}{Z_x + Z_0} Z_0; \quad (7)$$

$$U_x = U \frac{Z_x}{Z_0}; \quad U_0 = U.$$

Підставивши їх у рівняння (4), отримаємо рівність (6). Такий принцип покладено в основу побудови цифрових омметрів [11] та CLR-параметрів [12]. Однак для вимірювання  $Z_x$ , який змінюється в широкому діапазоні значень умова, рівності струмів не виконується. Зумовлено це неінформативним імітансом (поданим як  $Z_1$  та  $Z_2$  переважно) на краях діапазону [13], а в активному подільнику (рис.1,б) ще й додатково неідеальністю ОП [14]. В результаті цього для пасивного ВП отримуємо

$$Z_x = Z_0 \frac{T_x}{T_0} \frac{1 + \frac{Z_x}{Z_2}}{1 + \frac{Z_0}{Z_1}} \approx Z_0 \frac{T_x}{T_0} \left( 1 + \frac{Z_x}{Z_2} - \frac{Z_0}{Z_1} \right) \quad (8)$$

Особливістю реалізації рівності струмів схемою (рис.1,б) є те, що вона без додаткових активних елементів дозволяє практично усунути вплив неінформативного імітансу. Здійснюється це трізатискачевою схемою під'єднання. Однак через неідеальність ОП (коефіцієнт підсилення  $k$  не дорівнює нескінченності) для активного ВП отримуємо

$$Z_x = Z_0 \frac{1}{1 + \frac{1}{k} \left( 1 + \frac{Z_x}{Z_0} + \frac{Z_{bx}}{Z_0} \right)} \frac{T_x}{T_0} \approx Z_0 \frac{T_x}{T_0} \left[ 1 - \frac{1}{k} \left( 1 + \frac{Z_x}{Z_0} + \frac{Z_{bx}}{Z_0} \right) \right] \quad (9)$$

Отже, одержані вирази (8) та (9) відрізняються від виразу (6), тобто містять похибку. Значення похибки залежить від рівня впливу неінформативного імпедансу (вираз 8) та коефіцієнта підсилення ОП (вираз 9).

**4. Висновки**

Вирази, які описують результат вимірювання мостом (вираз 3) і вимірювачем з прямим перетворенням (вираз 9), подібні. Відмінність полягає лише в тому, що замість  $Z_A/Z_B$  маємо відношення інтервалів часу  $T_x/T_0$ . Тобто у мостових схемах, які реалізують нульовий метод вимірювання, зрівноваження здійснюється зміною відношення  $Z_A/Z_B$  до рівноваги напруг  $U_x/U_0=1$ , а також (або) зміною  $Z_0$  при  $Z_A/Z_B=const$ . За методом з прямим перетворенням схема також "зрівноважується" операцією двотактного інтегрування. Різниця полягає в тому, що у вимірювачах прямого перетворення фіксується нульова різниця інтегралів аналогічних величин, а в мостах – різниця їх абсолютних значень. Причому в кожному із зазначених випадків можна використовувати для фіксації нульового рівня однаковий засіб вимірювання. Щодо порівняння за точністю таких засобів, то у вимірювачах з прямим перетворенням точність не повинна бути нижчою, оскільки інтервали часу вимірюються точно [16]. Отже, на думку автора, це дає підстави розглядати ці структури як адекватні щодо метро-

логічних можливостей вимірювання параметрів імітансу, оскільки вони реалізують один і той самий нульовий метод вимірювання. Для цього необхідні:

1) ідеальність перетворення комплексної пасивної величини в комплексну напругу, забезпечуючи  $I_x = I_0$ ;

2) ідеальність перетворення векторної величини у скалярну, що здійснюється фазочутливими схемами, забезпечуючи

$$U_c = k_c \operatorname{Re}(U_x) = k_c \operatorname{mod}(U_x) \cos(\arg U_x - \arg U_0),$$

$$U_k = k_k \operatorname{Im}(U_x) = k_k \operatorname{mod}(U_x) \sin(\arg U_x - \arg U_0),$$

де  $U_c$ ,  $U_k$  – синфазна і квадратурна складові комплексної напруги  $U_x$ ,  $k_c$ ,  $k_k$  – коефіцієнти перетворення фазочутливих схем.

Тобто перетворювачі, як векторні (ВП), так і вектор-скаляр (ПВС) повинні мати похибки, значення яких практично не впливають на результат. У практичній реалізації таких перетворювачів це не виконується. Тому актуальним є вдосконалення ВП і ПВС для досягнення адекватності мостів та вимірювачів з прямим перетворенням в практичній реалізації. Багато в цьому напрямі вже зроблено як в теорії, так і в практиці. В частковому випадку, а саме при вимірюванні опору постійному струмові з використанням принципу двоканальності можна здійснювати вимірювання з похибкою зразкової міри опору [12]. Похибку міри опору можна отримати і при вимірюваннях реактивних параметрів імітансу [17], забезпечивши вказані вище умови. Зростаюча досконалість сучасної елементної бази, зокрема аналогової мікроелектроніки (операційні підсилювачі) та АЦП сприяє вдосконаленню схематехнічних рішень щодо побудови ВП, ПВС та структур вимірювача в цілому.

1. Походило Е.В. Малогабаритные измерители CLR-параметров прямого преобразования. Автореф. дис. ... канд. техн. наук 1990 2. Масюренко Ю.А. Логометрические преобразователи с автоматической коррекцией погрешностей. М., 1983. 3. Гаврилюк М.А., Соголовский Е.П. Электронные измерители CLR. 1979. 4. Емкосины // Гриневич Ф.Б., Сурду М.Н., Левицкий А.С. и др. АН УССР. Институт электродинамики. К., 1990. 5. Гриневич Ф.Б. Автоматические мосты переменного тока. Новосибирск, 1964. 6. Гриневич Ф.Б., Грохольский А.А., Соболевский К.М., Цапенко М.П. Трансформаторные измерительные мосты. Под ред. К.Б. Карандеева. М., 1970. 7. Волгин Л.И. Принципы построения и сравнительный анализ аналоговых операционных преобразователей. Таллин, 1973. 8. Мартяшин А.И., Шахов Э.К., Шлядин В.М. Преобразователи электрических параметров для систем контроля и измерения. М., 1976. 9. Добров Е.Е., И.Г. Татаринцев, Черноус В.Н., Штамбергер Г.А. Раздельное преобразование комплексных сопротивлений. Львов, 1985. 10. Прянишников В.А. Интегрирующие цифровые вольтметры постоянного тока. Л., 1976. 11. Гаврилюк М.О., Походило С.В., Хома В.В. Активні перетворювачі CLR-параметрів // Збірник матеріалів 3-ї н-т конф. "Вимір. та обчисл. техніка в техпроцесах і конверсії виробництва", Хмельницький, 1995. 12. Universal digital instruments for measuring systems. N. Gitshow, A. Konopkin, R. Kurdydyk, J. Pochodylo, V/ Tkatchenko. Modern electrical and magnetic measurements (7-fh tc-4), Symposium, Prague, 1995. 13. Гаврилюк М.О., Походило С.В., Соголовський С.П., Хома В.В. Вимірювачі імітансу з прямим перетворенням // Вимірювальна техніка та метрологія. 1996, Вип.52. 14. Походило С., Бойко Т. Оцінювання впливу неінформативного імітансу в перетворювачах CLR-параметрів // Вимірювальна техніка та метрологія. 1999, №55. 15. Походило С. Оцінювання похибок вимірювання параметрів смісних перетворювачів // Вимірювальна техніка та метрологія, 2000, №56. С.24-27. 16. Швецкий Б.И. Электронные цифровые приборы, К., 1981. 17. Походило С.В. Цифровой измеритель CLR-параметров // Metody i technika przetwarzania sygnałów w pomiarach fizycznych. Materiały Międzynarodowego seminarium metrologów, Rzeszów, 1996.