



**М. Сурду**, доктор технічних наук, професор, заступник директора з наукової роботи,  
**О. Ламеко**, директор,  
**О. Панич**, інженер з метрології,  
 Науково-дослідний інститут прецизійних випробувань ДП «Укрметрестандарт»,  
**О. Лабузов**, кандидат технічних наук, директор,  
 ТОВ «Комерційно-виробнича фірма «Промікс», м. Київ

*Описується знову розроблений вимірник імпедансу, що працює у широкому діапазоні частот і значень. Вимірник побудовано на основі нових принципів вимірювання імпедансу з редукованим набором мір і нових методів калібрування вимірювальних ланцюгів, які дозволяють істотно підвищити точність вимірювання й автоматизувати процес метрологічного налагодження апаратури.*

*The new precision impedance meter, operating in wide frequency range and values is described. The impedance meter is based on the base of new method of impedance measurement with reduced number of inner standards. The new methods of measuring circuit calibration permit to improve sufficiently measurement accuracy and to automate the manufacturing process.*

### 1. ВСТУП

**В**изначення параметрів імпедансу є великою сферою вимірювань, що стосується як електричних вимірювань, так і вимірювань неелектричних величин. Автоматична апаратура, використовувана для таких вимірювань, інтенсивно розробляється й випускається багатьма закордонними фірмами. Сьогодні найбільш відома апаратура фірм Вайн Керр, Тегам, Х'юлетт Паккард. Вони випускають найбільш точну апаратуру (класу (0,02—0,1) %), що працює у широкому діапазоні

частот. В основу побудови цієї апаратури покладені або мости змінного струму (Тегам), або вимірники прямого перетворення логометричного типу (Х'юлетт Паккард, Вайн Керр). Останнім часом, у зв'язку із широким використанням обчислювальної техніки, останній тип апаратури знаходить усе більше застосування в силу її простоти. Цей напрямок створення вимірювальної апаратури використано й у процесі створення прецизійного вимірника параметрів імпедансу, що розглядається.

## 2. ОПИС ВИМІРНИКА

Вимірник складається із таких основних частин (рис. 1):

- генератор Г з цифровим керуванням за частотою й амплітудою сигналу;
- вимірвальний ланцюг;
- вхідні комутатори  $K_1$  і  $K_2$ ;
- векторний вольтметр;
- мікроконтролер МС;
- блок індикації Т;
- блок клавіатури D.

Генератор складається із двох вузлів: синтезатора сітки частот з кільцем фазового автопідстроювання й синтезатора синусного сигналу.

Синтезатор сітки частот дозволяє отримати сигнал змінної частоти, значення якої може задаватися з передньої панелі приладу. Діапазон формованих робочих частот — постійний струм і змінний струм від 0,5 Гц до 100 000 кГц. Дискретність установа частоти —  $(1-3) \cdot 10^{-5}$ .

Синтезатор синусного сигналу формує з дискретного сигналу на виході синтезатора сітки частот сигнал синусоїдальної форми з малими нелінійними спотвореннями, регульованою амплітудою й необхідною потужністю, що використовується для живлення вимірвального ланцюга.

Вимірвальний ланцюг складається з об'єкта вимірювання  $Z_x$ , послідовно з'єданого з баластним

опором  $R_0$  і включеного між виходом генератора й входом захисного підсилювача DA. У ланцюзі зворотного зв'язку захисного підсилювача включено еталонний резистор  $R_0$ , опір якого змінюється у процесі перемикання меж. Під дією напруги генератора через об'єкт вимірювання й опір зворотного зв'язку протікає один і той же струм  $I_x$ , створюючи на цих опорах відповідно дві напруги  $U_x$  й  $U_0$ . Очевидно, що відповідно до закону Ома відношення цих напруг дорівнюватиме відношенню опорів, або:

$$Z_x = R_0 U_x / U_0 \quad (1)$$

Рівняння (1) є вимірвальним рівнянням приладу.

Напруги  $U_x$  й  $U_0$  вимірюються диференціальним векторним вольтметром.

Для цього векторний вольтметр має диференціальні входи (на його вході включено диференціальний підсилювач із високим коефіцієнтом подавлення синфазної завади), які підключаються до потенційних зажимів об'єкта вимірювання й еталонної міри за допомогою комутаторів  $K_1$  і  $K_2$ . Комутатор  $K_1$  служить для підключення векторного вольтметра по чергово до потенційних зажимів об'єкта вимірювання й еталонної міри. Комутатор  $K_2$  служить для зміни фази підключення входів векторного вольтметра до джерел вимірюваної напруги. Одночасно зі зміною стану комутатора  $K_2$  інвертується фаза напруги генератора.

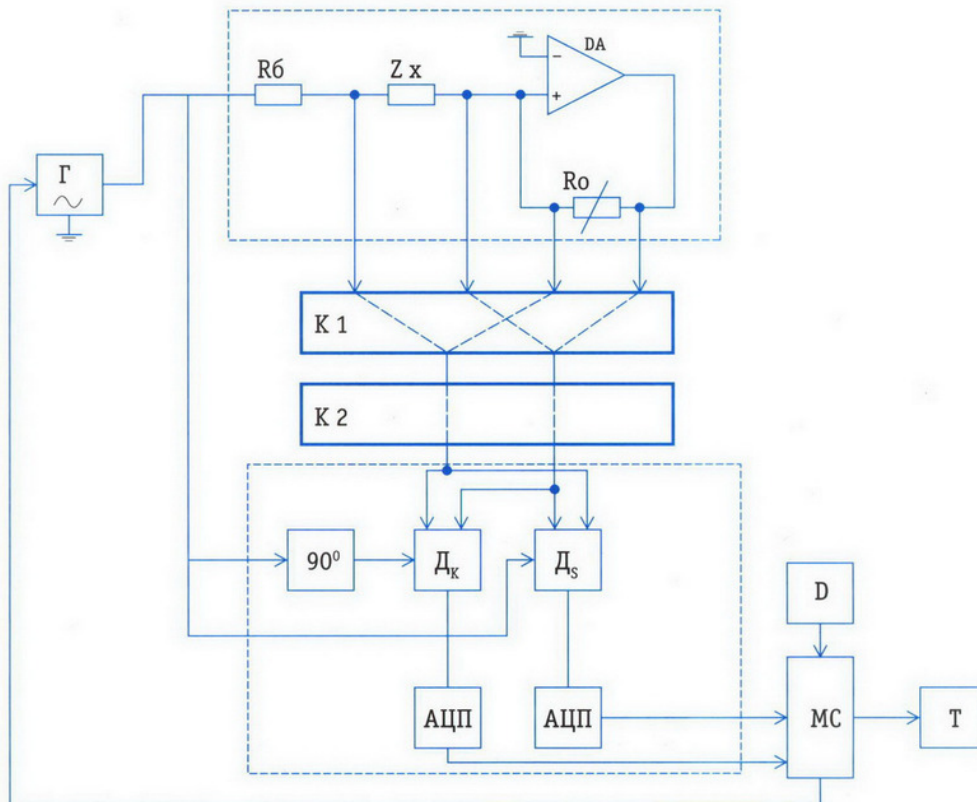


Рис. 1

У процесі вимірювання напруг  $U_x$  й  $U_o$  на вході векторного вольтметра діють вимірюваний сигнал ( $U_x$  або  $U_o$ ), синфазна завада  $U_c$  і постійна напруга зсуву  $U_{cm}$ . На виході диференціального підсилювача векторного вольтметра діють вимірюваний сигнал ( $U_x$  або  $U_o$ ), неподавлена частина синфазної завади  $\Delta U_c$  і неподавлена частина постійної напруги зсуву  $\Delta U_{cm}$ . Вимірювання кожної з напруг  $U_x$  або  $U_o$  виконується у два такти: за умови  $+U_r$  і за умови  $-U_r$ . Результат вимірювання  $U_{x(o)}$  будь-якої з двох напруг  $U_x$  й  $U_o$  за двох фаз напруги генератора описується двома виразами:

$$\begin{aligned} U_{x(o)+} &= U_{x(o)} + \Delta U_{cm} + \Delta U_c; \\ U_{x(o)-} &= U_{x(o)} - \Delta U_{cm} - \Delta U_c; \end{aligned} \quad (2)$$

Результат вимірювання напруг  $U_x$  або  $U_o$  визначається як напівсума описаних окремих результатів вимірювання:

$$U_{x(o)} = (U_{x(o)+} + U_{x(o)-})/2 \quad (3)$$

Цей результат, очевидно, не залежить від адитивних завад  $\Delta U_{cm}$  й  $\Delta U_c$ .

Описаний алгоритм вимірювання дозволяє повністю виключити не тільки вплив  $\Delta U_{cm}$  й  $\Delta U_c$ , але й вплив зсувів нуля синхронних детекторів, аналого-цифрових перетворювачів й інших адитивних джерел похибки на результат вимірювання.

Вплив неідеальності коефіцієнта передавання векторного вольтметра і його мультиплікативної похибки на результат вимірювання усувається за рахунок скорочення множника за  $U_x$  й  $U_o$  у процесі обчислень результату за формулою (1).

Векторний вольтметр складається із двох синхронних детекторів  $D_s$  й  $D_c$ , що мають синусоїдальні опорні сигнали, фази яких зміщено на  $90^\circ$ . Синхронні детектори випрямляють вимірювані змінні сигнали й здійснюють фільтрацію постійної складової. Вихідні випрямлені напруги синхронних детекторів вимірюються за допомогою двох 24-розрядних  $\Sigma$ - $\Delta$  аналого-цифрових перетворювачів ADC<sub>s</sub> й ADC<sub>c</sub>.

Для підвищення точності вимірювань використовується двоканалний векторний вольтметр автоматично калібрується. Відповідно до розробленого алгоритму на вхід векторного вольтметра подається калібрувальний сигнал  $U_r = U_{rm} \sin(\omega t + \varphi_o)$ . Потім виконуються вимірювання квадратурних  $U_1$  й  $U_2$ , а також  $U_3$  й  $U_4$  складових цього сигналу під час подавання по черзі на опорні входи детекторів послідовно двох опорних напруг  $U_{соп+} = U_{соп} = U_{оп} \sin \omega t$  й  $U_{соп-} = U_{соп} = U_{оп} \cos \omega t$  відповідно.

Різниця фазових затримок  $tg \Delta \varphi$  і відношення коефіцієнтів передавання  $K$  каналів векторного вольтметра у цьому випадку визначається за формулами:

$$\begin{cases} tg \Delta \varphi = \frac{U_2 \cdot U_3 - U_1 \cdot U_4}{U_1 \cdot U_2 - U_3 \cdot U_4}; \\ K = \frac{U_1}{U_2} \cdot \frac{\left(1 + \frac{U_3}{U_1} \cdot tg \Delta \varphi\right)}{\sqrt{1 + (tg \Delta \varphi)^2}}. \end{cases}$$

У процесі визначення  $Z_x$  вимірюються складові вхідного сигналу векторного вольтметра  $U_s$  й  $U_c$ . Складові вхідного сигналу  $U_{sk}$  й  $U_{ck}$ , використовувані для визначення  $Z_x$  за формулою (1), з урахуванням похибок векторного вольтметра, визначаються за формулами:

$$U_{sk} = \frac{U_s}{K};$$

$$U_{ck} = U_{sk} \cdot tg \Delta \varphi + U_c \cdot \sqrt{1 + (tg \Delta \varphi)^2}.$$

Результати вимірювань аналого-цифрових перетворювачів надходять у мікроконтролер МС, який відповідно до рівняння (1) розраховує результат вимірювання.

Результат вимірювання імпедансу індикуюється на матричному чотирирозрядному рідкокристалічному табло, на якому також виводиться інформація стосовно розмірності результату вимірювання, робочої частоти, вимірювальних режимів тощо.

Оператор управляє процесом вимірювання за допомогою клавіатури D, уводячи необхідну інформацію за допомогою мікроконтролера, що опитує клавіатуру. RLC-метр вимірює параметри комплексного опору на восьми десяткових межах (рис. 2). Для переходу з однієї межі вимірювання на іншу виконується перемикання еталонних мір у ланцюзі зворотного зв'язку захисного підсилювача РА. При цьому для вимірювання на восьми межах використовуються чотири еталонні міри опору з номіналами 1, 100, 10 000 й 1 000 000 Ом. На першій межі ( $0 < Z < 1$  Ом) і всіх інших непарних межах вимірювання проводяться у режимі заданого струму на об'єкті вимірювання, на парних межах вимірювання проводяться у режимі заданої напруги. Використання такого алгоритму дозволяє однією мірою перекрити два діапазони вимірювання.

На додаткових межах 9 й 10 еквівалентне значення внутрішньої еталонної міри збільшується у 10 й 100 разів відповідно. Це дозволяє розширити діапазон вимірювання й роздільну здатність приладу до  $10^{-11}$  см.

Основними у приладі є внутрішні міри опору з номіналами 100 Ом й 10 кОм. Для забезпечення високої точності вимірювань на межах, де використовуються інші міри, у приладі передбачено режим калібрування. У процесі калібрування виконується

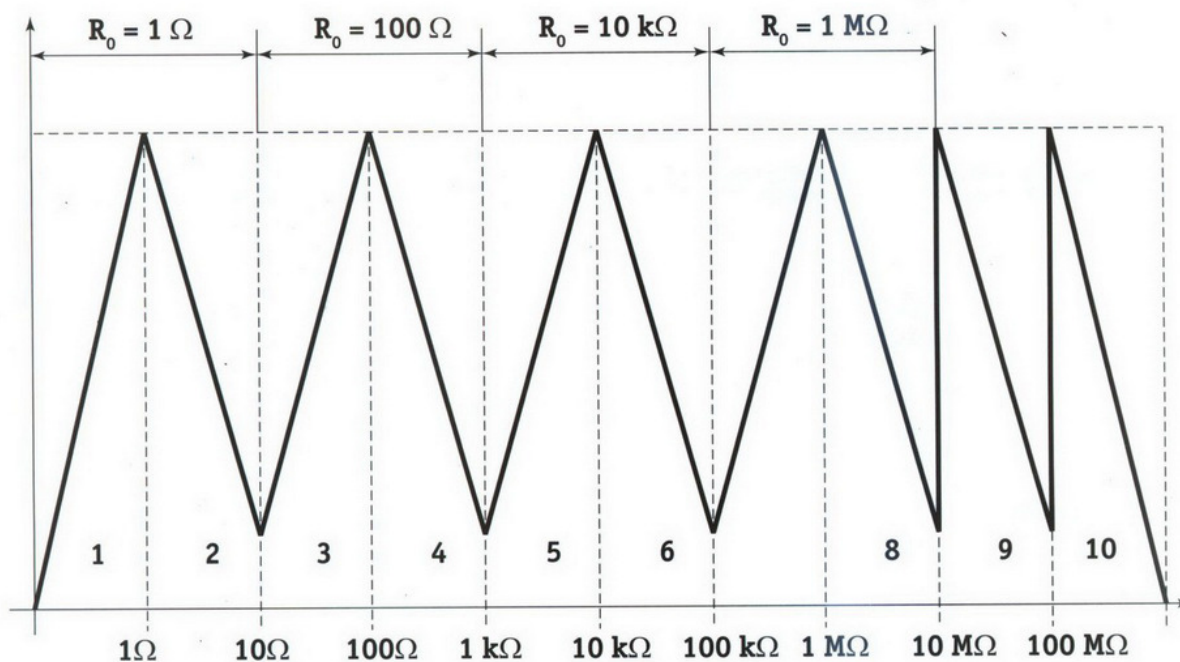


Рис. 2

автоматичне передавання розміру параметра імпедансу до всіх внутрішніх мір приладу. При цьому з високою точністю визначається імпеданс усіх внутрішніх мір приладу. Процес передавання розміру параметра внутрішньої міри виконується автоматично послідовно на ряді фіксованих частот у всьому діапазоні робочих частот. Це дозволяє не лише визначити значення внутрішніх мір, але й знайти коефіцієнти поліномів, що апроксимують частотну залежність параметрів кожної із внутрішніх мір від частоти. Названі поліноми використовуються під час розрахунку результатів вимірювання на заданій робочій частоті. Таке калібрування дозволяє знизити частотну похибку приладу до ста й більше разів.

### 3. ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИЛАДУ

#### Основні параметри

RLC-метр забезпечує автоматичний вибір діапазону вимірювань, вимірюваних величин і характеру реактивності еквівалентної схеми заміщення об'єкта вимірювання.

RLC-метр забезпечує чотирипарне підключення об'єкта вимірювання.

RLC-метр забезпечує вимірювання з регулюванням частоти напруги змінного струму, що подається на об'єкт вимірювання.

RLC-метр забезпечує вимірювання з регулюванням значення напруги змінного струму, що подається на об'єкт вимірювання.

Під час роботи з персональним комп'ютером (ПК) RLC-метр забезпечує спільну роботу за інтерфейсом RS-232.

RLC-метр має такі режими роботи:

- «Калібрування», що забезпечує калібрування RLC-метра за зовнішньою еталонною мірою опору, ємності або індуктивності, позначений «Cal»;
- «Усереднення результатів вимірювання» із установлюваним за допомогою клавіатури числом вимірень від 2 до 99, позначений «Σ»;
- «Облік початкових параметрів за послідовною схемою», позначений «Short»;
- «Облік початкових параметрів за паралельною схемою», позначений «Open»;
- «Вимірювання відсоткових відхилень», позначений «%»;
- «Вимірювання взаємної індуктивності», позначений «M»;
- «Вимірювання опору постійному струму», позначений «R<sub>DC</sub>».

RLC-метр має такі режими вимірювань:

- ♦ «Разові вимірювання», позначений «mode», що індикуються на індикаторі «sng»;
- ♦ «Стеження» (безперервні вимірювання), позначений «mode», що індикуються на індикаторі «cnt».

Час установлення робочого режиму RLC-метра у нормальних і робочих умовах застосування не більше 0,5 годин з моменту його включення.

RLC-метр допускає тривалість безперервної роботи протягом 9 годин. Час до повторного включення не менше 1 години.

Електроживлення RLC-метра здійснюється від мережі змінного струму частотою  $(50 \pm 1)$  Гц і напругою  $(220 \pm 22)$  В.

Метрологічні характеристики

Діапазони значень вимірюваних величин наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Вимірювана величина	Діапазон
R, Ом	від $1 \cdot 10^{-6}$ до $1 \cdot 10^{12}$
C, Ф	від $1 \cdot 10^{-16}$ до 1000
L, Гн	від $1 \cdot 10^{-10}$ до $1 \cdot 10^9$
M, Гн	від $1 \cdot 10^{-6}$ до $1 \cdot 10^0$
tg $\delta$ , відн. одиниці	від $1 \cdot 10^{-5}$ до $1 \cdot 10^5$
tq $\varphi$ , відн. одиниці	від $\pm 1 \cdot 10^{-5}$ до $\pm 1 \cdot 10^5$
R <sub>DC</sub> , Ом	від $1 \cdot 10^{-6}$ до $1 \cdot 10^{12}$
відсоткові відхилення, %	$\pm 100$

Робочі частоти:

- постійний струм,
- змінний струм, Гц.....від 0,5 до 100 000;
- дискретність установлення робочої частоти ..... не гірше  $3 \cdot 10^{-5}$ ;
- похибка задання робочої частоти.....менше  $2 \cdot 10^{-5}$ .

Клас точності

- на основній частоті 1 кГц .....0,01/0,002
- під час калібрування за зовнішньою мірою ..... 0,003/0,0002

Залежність похибки вимірювання від значення вимірюваної величини й частоти задається формулами, наведеними у таблицях 2—4.

Таблиця 2

Похибки вимірювання активного опору і тангенса фазового кута резисторів									
$\delta_R = \delta_{Ri} \cdot (1 + \alpha \cdot R_o/R_x) \cdot (1 + \mu \cdot \delta f + \beta \cdot \delta^2 f)$			$\Delta \text{tg} \varphi = (1 + \tau \cdot \delta f) \cdot (\Delta \text{tg} \varphi_o + \gamma \cdot \text{tg} \varphi_x) \cdot (1 + \alpha \cdot R_o/R_x)$			$i = 1, 3, 5, 7$			
$\delta_R = \delta_{Ri} \cdot (1 + \alpha \cdot R_x/R_o) \cdot (1 + \mu \cdot \delta f + \beta \cdot \delta^2 f)$			$\Delta \text{tg} \varphi = (1 + \tau \cdot \delta f) \cdot (\Delta \text{tg} \varphi_o + \gamma \cdot \text{tg} \varphi_x) \cdot (1 + \alpha \cdot R_x/R_o)$			$i = 2, 4, 6, 8, 9, 10$			
i	R <sub>o</sub> , Ом	R <sub>x</sub> , Ом	$\delta_{Ri}(\%)$	$\Delta \text{tg} \delta_o$ (%)	$\alpha$	$\mu$	$\beta$	$\gamma$	$\tau$
1	1	0—1	0,02	0,1	0,1	0,5	0,001	0,1	0,1
2	1	1—10	0,01	0,05	0,1	0,2	0,0005	0,1	0,05
3	100	10—100	0,01	0,01	0,1	0,1	0,0001	0,1	0,02
4	100	100—1000	0,01	0,01	0,1	0,1	0,0001	0,1	0,02
5	10 к	1 к—10 к	0,01	0,01	0,1	0,1	0,0001	0,1	0,02
6	10 к	10 к—100 к	0,01	0,05	0,1	0,1	0,0001	0,1	0,02
7	1 М	100 к—1000 к	0,02	0,1	0,1	0,2	0,0002	0,1	0,05
8	1 М	1 М—10 М	0,05	0,1	0,3	0,5	0,0005	0,1	0,1
9	10 М	10 М—100 М	0,3	0,3	0,3	1,0	0,001	0,3	0,3
10	100 М	100 М—∞	1,0	1,0	1	2,0	0,01	1,0	1,0

Таблиця 3

Похибки вимірювання ємності й тангенса кута втрат конденсаторів									
$\delta_R = \delta_{Ri} \cdot (1 + \alpha \cdot \omega C_x R_o) \cdot (1 + \mu \cdot \delta f + \beta \cdot \delta^2 f)$			$\Delta \text{tg} \delta = (1 + \varphi \cdot \delta f) \cdot (\Delta \text{tg} \delta_o + \gamma \cdot \text{tg} \delta_x) \cdot (1 + \alpha \cdot \omega C_x R_o)$			$i = 1, 3, 5, 7$			
$\delta_R = \delta_{Ri} \cdot (1 + \alpha / \omega C_x R_o) \cdot (1 + \mu \cdot \delta f + \beta \cdot \delta^2 f)$			$\Delta \text{tg} \delta = (1 + \varphi \cdot \delta f) \cdot (\Delta \text{tg} \delta_o + \gamma \cdot \text{tg} \delta_x) \cdot (1 + \alpha / \omega C_x R_o)$			$i = 2, 4, 6, 8, 9, 10$			
i	R <sub>o</sub> , Ом	1/ωC <sub>x</sub>	$\delta_{Ri}(\%)$	$\Delta \text{tg} \delta_o$ (%)	$\alpha$	$\mu$	$\beta$	$\gamma$	$\varphi$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	0—1	0,05	0,1	0,1	0,5	0,001	0,1	0,05
2	1	1—10	0,02	0,05	0,1	0,2	0,0005	0,1	0,02

Продовження таблиці 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3	100	10—100	0,01	0,02	0,1	0,1	0,0001	0,1	0,01
4	100	100—1000	0,01	0,02	0,1	0,1	0,0001	0,1	0,01
5	10 к	1 к—10 к	0,01	0,02	0,1	0,1	0,0001	0,1	0,01
6	10 к	10 к—100 к	0,01	0,02	0,1	0,1	0,0001	0,1	0,01
7	1 М	100 к—1000 к	0,02	0,05	0,1	0,2	0,0002	0,1	0,05
8	1 М	1 М—10 М	0,05	0,1	0,1	0,5	0,0005	0,1	0,1
9	10 М	10 М—100 М	0,3	0,3	0,3	1,0	0,001	0,3	0,3
10	100 М	100 М—∞	1,0	1,0	1,0	2,0	0,01	1,0	1,0

Таблиця 4

Похибки вимірювання індуктивності й тангенса кута втрат котушок індуктивності									
$\delta_R = \delta_{R_i} \cdot (1 + \alpha \cdot R_o / \omega L_x) \cdot (1 + \mu \cdot \delta f + \beta \cdot \delta^2 f)$			$\Delta \text{tg} \delta = (1 + \varphi \cdot \delta f) \cdot (\Delta \text{tg} \delta_o + \gamma \cdot \text{tg} \delta_x) (1 + \alpha \cdot R_o / \omega L_x)$			i = 1, 3, 5, 7			
$\delta_R = \delta_{R_i} \cdot (1 + \alpha \cdot \omega L_x / R_o) \cdot (1 + \mu \cdot \delta f + \beta \cdot \delta^2 f)$			$\Delta \text{tg} \delta = (1 + \varphi \cdot \delta f) \cdot (\Delta \text{tg} \delta_o + \gamma \cdot \text{tg} \delta_x) (1 + \alpha \cdot \omega L_x / R_o)$			i = 2, 4, 6, 8, 9, 10			
i	R <sub>o</sub> , Ом	ωL <sub>x</sub>	δ <sub>Ri</sub> (%)	Δtgδ <sub>o</sub> (%)	α	μ	β	γ	φ
1	1	0—1	0,1	0,1	0,1	0,5	0,001	0,1	0,1
2	1	1—10	0,05	0,05	0,1	0,2	0,0005	0,1	0,05
3	100	10—100	0,01	0,01	0,1	0,1	0,0001	0,1	0,01
4	100	100—1000	0,01	0,01	0,1	0,1	0,0001	0,1	0,01
5	10 к	1 к—10 к	0,01	0,01	0,1	0,1	0,0001	0,1	0,01
6	10 к	10 к—100 к	0,01	0,01	0,1	0,1	0,0001	0,1	0,01
7	1 М	100 к—1000 к	0,05	0,05	0,1	0,2	0,0002	0,1	0,05
8	1 М	1 М—10 М	0,1	0,1	0,1	0,5	0,0005	0,1	0,1
9	10 М	10 М—100 М	0,3	0,3	0,3	1,0	0,001	0,3	0,3
10	100 М	100 М—∞	1,0	1,0	1,0	2,0	0,01	1,0	1,0

## Примітки:

а)  $\delta f = \Delta F / F_o$  за умови  $F_p \geq F_o$  $\delta f = 0,003 \cdot \Delta F / F_p$  за умови  $F_p \leq F_o$ де:  $\Delta F$  — відхилення робочої частоти  $F_p$  від основної частоти  $F_o$  (1 кГц);б) діапазони вимірювання з  $R_o = 1$  М використовуються до частоти 100 кГц.

в) похибка вимірювання у режимі калібрування за зовнішньою мірою визначається наведеною величиною у діапазоні вимірюваних опорів, ширина якого не перевищує 10 % від імпедансу зовнішньої міри.

Дискретність цифрового відліку (на меншому діапазоні вимірювань):

за R, Ом.....  $1 \cdot 10^{-6}$ за C, Ф.....  $1 \cdot 10^{-17}$ за L, Гн.....  $1 \cdot 10^{-11}$ за M, Гн.....  $1 \cdot 10^{-10}$ Похибка вимірювання опору постійному струму..... менша  $10^{-4}$ Похибка рівномірного порівняння опору на постійному струмі..... менша  $1 \cdot 10^{-5}$ 

Діапазон значень напруги змінного струму на об'єкті вимірювання

(залежно від значень вимірюваних величин), В..... від 0,01 до 5

Час вимірювання на частоті 1 кГц, с..... не більший 2

Споживана потужність, ВА..... не більша 10

Габаритні розміри, мм..... не більші  $250 \times 180 \times 50$ Маса, кг..... не більша 3,5 