

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

М. А. КАРАПЕТЯН, В. С. СИМОНЯН, А. Г. ГУКАСЯН

МЕТОД НЕПРЕРЫВНОГО ИЗМЕРЕНИЯ УГЛА  
 ПОТЕРЬ КОНДЕНСАТОРА

В [1] предложен метод измерения емкости конденсаторов низкой добротности, который с успехом может быть применен для непрерывного измерения угла потерь  $\delta$ . Пусть последовательная цепь (рис. 1)  $L_0, C_0$  настроена в резонанс при разомкнутых зажимах  $a - b$  и нам известна точная величина емкости при резонансе:

$$x_{L_0} - x_{C_0} = x_0. \quad (1)$$

Подключим испытуемый конденсатор к зажимам  $a - b$ , представив его эквивалентной параллельной цепью  $C_x, r_x$ . Напряжение на зажимах  $a - b$  определяется из выражения

$$U_{ab} = U_{ab0} e^{j\varphi_a} = \frac{U}{x_0} \frac{r_x x_c}{r_x^2 + x_x^2} e^{j \arctg \frac{x_x}{r_x}}, \quad (2)$$

где

$$\varphi_a = \arctg \frac{x_x}{r_x} = \delta. \quad (2')$$

Иначе говоря, фазовый сдвиг между напряжениями  $U$  и  $U_{ab}$  равен углу потерь испытуемого конденсатора. Если к зажимам „Опорное напряжение“ подключить напряжение  $U$ , а к зажимам „Сигнал“ напряжение  $U_{ab}$ , то на шкале электронного фазометра (например, типа Ф2-1) непосредственно прочтем угол  $\delta$ .

Если к этой схеме добавить электронный вольтметр, подключенный к тем же зажимам  $a - b$ , можно измерять и емкость

$$C_x = \frac{UC_0}{U_{ab} \{ 1 + \operatorname{tg}^2 \delta \}} \quad (3)$$

Выясним некоторые метрологические особенности предложенного измерителя. Определим чувствительность схемы по приращению на-

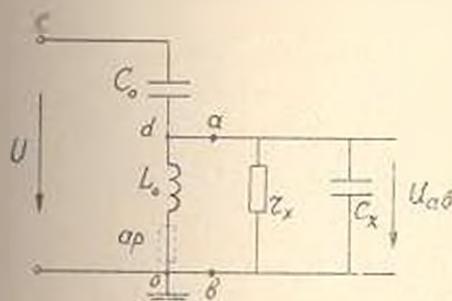


Рис. 1. Принципиальная схема измерителя угла потерь и емкости.

пряжения  $U_{ab}$  при малых приращениях  $\operatorname{tg} \delta$  и  $C_s$ . Обозначим малые относительные приращения  $C_s$  и  $\operatorname{tg} \delta$  соответственно  $\alpha_c$  и  $\alpha_{\operatorname{tg} \delta}$ , отношение емкости  $\frac{C_0}{C_s}$  буквой  $m$ , получим:

$$\Delta U_{ab} = -mU \left[ \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}} \alpha_c + \frac{\operatorname{tg}^2 \delta}{(1 + \operatorname{tg}^2 \delta)^{3/2}} \alpha_{\operatorname{tg} \delta} \right]. \quad (4)$$

При  $\operatorname{tg} \delta \ll 1$   $\Delta U_{ab} \approx -mU \alpha_c$ .

При  $\operatorname{tg} \delta \gg 1$   $\Delta U_{ab} \approx -\frac{mU}{\operatorname{tg} \delta} (\alpha_c + \alpha_{\operatorname{tg} \delta})$ .

По чувствительности рассматриваемая схема превосходит четырехплечевую уравновешенную мостовую схему [2].

На рис. 1 пунктирными линиями показаны паразитные параметры цепи. Условие (1) устанавливалось экспериментально, что позволило исключить погрешность измерения, связанную с наличием межвитковой емкости катушки и емкости между проводами и корпусом прибора. Активное сопротивление потерь контура  $a_r$  представлено в виде последовательно соединенного с индуктивностью элемента. Здесь  $\rho$  — волновое сопротивление,  $a$  — обратная величина добротности контура.

С учетом сопротивления потерь  $a_r$  для напряжения между зажимами  $a - b$ , при  $a \ll 1$  получим

$$U_{ab} = mU \frac{\sqrt{(1 + a^2 m)^2 + (am + \operatorname{tg} \delta)^2}}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta + 2am \operatorname{tg} \delta + a^2 m(2 + m)}. \quad (5)$$

Для фазы этого напряжения будем иметь:

$$\psi_{ab} = \arctg \left( \operatorname{tg} \delta \frac{1 + \frac{am}{\operatorname{tg} \delta}}{1 + a^2 m} \right). \quad (6)$$

Из (5) и (6) следует, что погрешность измерения, вызванная пренебрежением активного сопротивления потерь, определяется отношением  $\frac{am}{\operatorname{tg} \delta}$ . Условием отсутствия данных систематических погрешностей будет

$$\frac{am}{\operatorname{tg} \delta} \ll 1. \quad (7)$$

Можно подобрать элементы  $C_0 L_0$  и сконструировать прибор так, чтобы имело место условие  $a \ll 10^{-2}$ . Тогда для нижнего граничного значения  $\delta$ , при котором систематическая погрешность отсутствует, получим

$$\delta = \arctg m. \quad (8)$$

Таким образом, измерения  $C$  и  $\delta$  свободны от систематической погрешности, вызванной пренебрежением сопротивлением потерь при значениях

$$\delta > \arctg m. \quad (9)$$

Из анализа причин систематических погрешностей следует, что при соблюдении условия (9) основная систематическая погрешность измерения  $\delta$  и  $C_x$  данным методом равна нулю.

Полагая, что измеритель снабжен генератором со строго фиксированной частотой  $f_0$  и выходным напряжением  $U$  и, что емкость  $C_0$  измерена с высокой точностью, найдем случайные погрешности измерений  $\delta$  и  $C_x$ . Угол  $\delta$  определяется непосредственно и поэтому относительная погрешность его измерения  $\sigma_\delta$  определяется погрешностью электронного фазометра, использованного в данном приборе.

Относительная среднеквадратичная погрешность измерения  $C_x$  согласно (3) определится из выражения

$$\sigma_c = \sqrt{\sigma_\delta^2 + \frac{\operatorname{tg}^2 \delta}{(1 + \operatorname{tg}^2 \delta)^2} \sigma_{\operatorname{tg} \delta}^2}. \quad (10)$$

Здесь  $\sigma_\delta$  и  $\sigma_{\operatorname{tg} \delta}$  — относительные погрешности измерений  $U_{\text{об}}$  и  $\operatorname{tg} \delta$ , соответственно.

Значения  $\operatorname{tg} \delta$ , при данном методе измерений, определяются из тригонометрических таблиц. Следовательно, погрешности измерения  $\delta$  приводят к погрешностям определения  $\operatorname{tg} \delta$ . Погрешность  $\sigma_{\operatorname{tg} \delta}$  через  $\sigma_\delta$  определится из выражения

$$\sigma_{\operatorname{tg} \delta} = \frac{\delta \sigma_\delta}{\sin \delta \cos \delta}. \quad (11)$$

В (11)  $\delta$  измеряется в радианах.

Подставив (10) в (9), получим

$$\sigma_c = \sqrt{\sigma_\delta^2 + \delta^2 \operatorname{tg}^2 \delta \sigma_\delta^2}. \quad (12)$$

Предлагаемый прибор может найти применение не только как устройство для непрерывного контроля величины угла  $\delta$ , но и как измеритель  $\operatorname{tg} \delta$  и  $C_x$ . Для повышения точности измерений  $\operatorname{tg} \delta$  и  $C_x$  при больших значениях угла  $\delta$ , следует в измерителе вольтметр и фазометр заменить фазочувствительным вольтметром.

Для экспериментальной проверки основных положений приведенной методики был собран макет измерителя. В макете использованы: генератор ГЗ-83, катушка индуктивности типа Р547  $L_0 = 0,1$  мкГн, магатины емкостей Р513 типа МЕРП, сопротивления типа ПЭВ, электронный вольтметр типа Ф534 и электронный фазометр типа Ф2-1. Параллельным соединением сопротивлений (величины последних определялись точным измерением мостом постоянного тока) с магазином емкости создавались конденсаторы известной емкости и угла диэлектрических потерь при параллельной эквивалентной схеме замещения. Измерения проводились при частоте 10 кГц. Резонанс в  $C_0, L_0$  контуре наступал при емкости  $C_0 = 0,0024$  мкФ. Добротность этого контура, определенная как отношение напряжения на конденсаторе к напряжению генератора,  $Q = 55$ .

Средние результаты четырех-пяти измерений при  $C_1 = 0,01 \text{ мкф}$  ( $m = 0,24$ ) приведены на рис. 2. Параллельно емкости включали 10 различных сопротивлений, величины которых изменяли в пределах от 345 ом до 16 ком. По оси абсцисс рис. 2 отмечены порядковые номе-

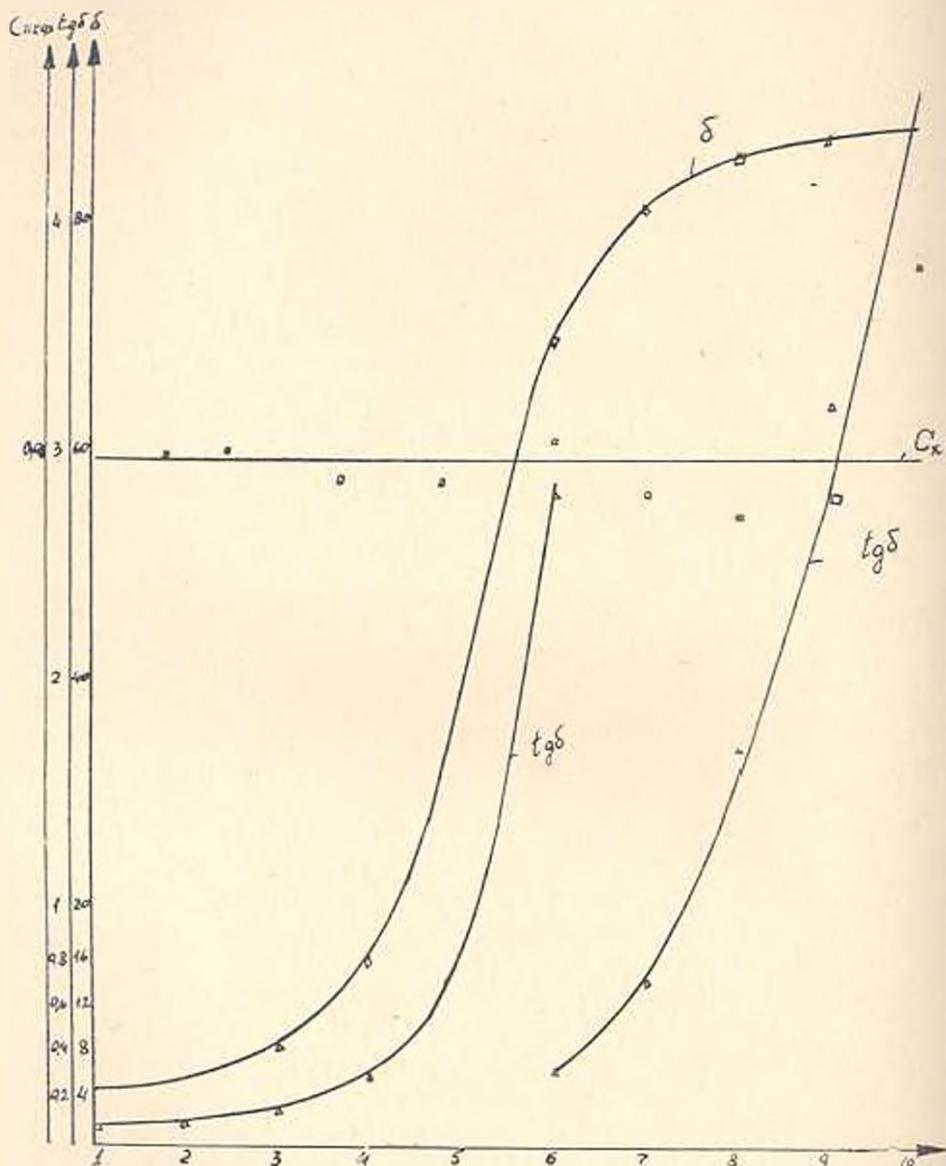


Рис. 2. Результаты экспериментальной проверки макета прибора при  $m = 0,24$ .

ра этих сопротивлений. На рис. 3 представлены результаты измерений для случая  $C_1 = 0,1 \text{ мкф}$  ( $m = 0,024$ ). Здесь отсутствуют данные измерений при сопротивлениях № 9 и № 10. Это объясняется тем, что при максимально допустимом для фазометра входном напряжении 50 в напряжение  $U_{ab}$  оказалось меньше 0,5 в и фазометр не давал достоверные результаты измерений.

На рис. 2 и 3 линии представляют расчетные значения  $\delta$ ,  $\operatorname{tg} \delta$  и величину емкости  $C_x$  по шкале магазина емкости, а треугольниками и квадратами — результаты опыта.

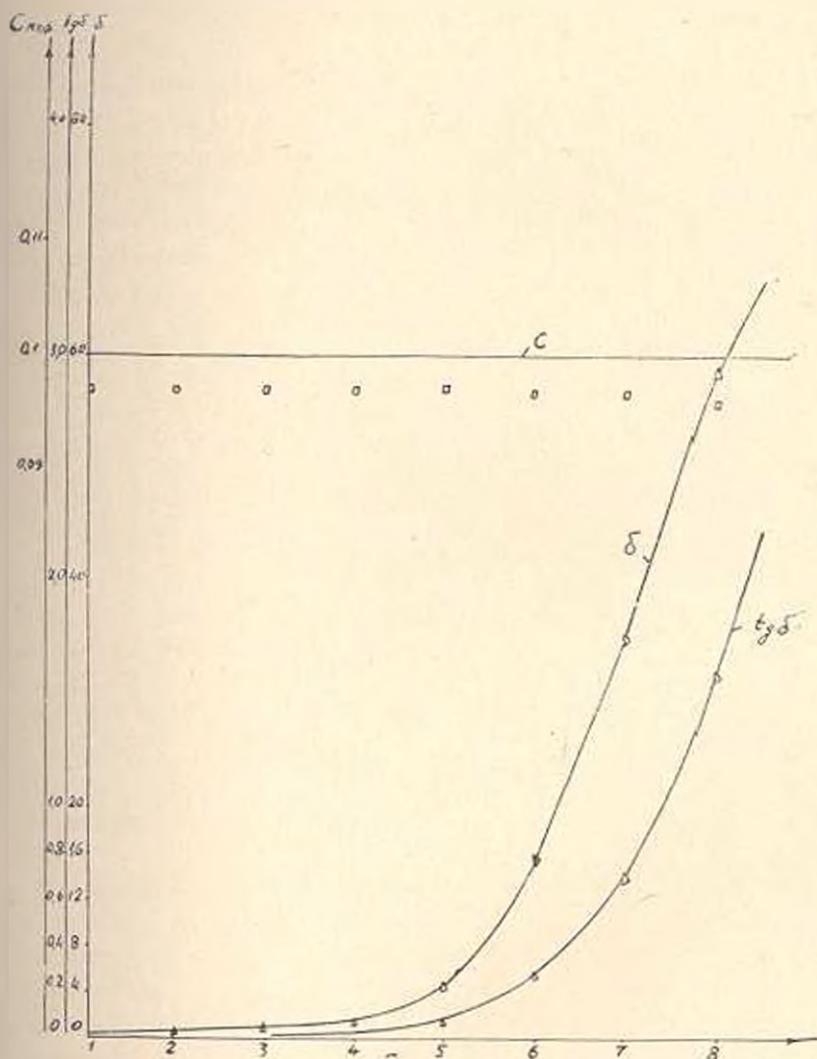


Рис. 3. Результаты экспериментальной проверки макета прибора при  $m = 0,024$ .

По результатам проведенного исследования можно отметить, что при соблюдении условия  $C_x > C_0$  измерительная цепь обеспечивает измерение угла  $\delta$  с погрешностью не более  $\pm 40-50$  минут. Однако применение в схеме фазометра Ф2—1 с максимальной погрешностью до  $\pm 2^\circ$  не может гарантировать названную точность измерений. Прибор может найти применение и в качестве измерителя емкости. При значениях  $\delta < 80^\circ$  емкость измеряется с погрешностью менее  $\pm 5\%$ . При углах  $\delta > 80^\circ$  погрешность измерения не превышает  $\pm 10\%$ .

Մ. Ա. ԿԱՐԱՊԵՏՅԱՆ, Վ. Ս. ՍԻՄՈՆՅԱՆ, Շ. Գ. ՂՈՒԿԱՍՅԱՆ

## ԿՈՆԳԵՆԱՍՏՈՐԻ ԿՈՐՈՒՍՏՆԵՐԻ ԱՆԿՅԱՆ ԱՆՐՆԳՄԵՋ ՉԱՓՄԱՆ ՄԵԹՈԳ

### Ա մ փ ո փ ու յ մ

Ըստ առաջարկվող մեթոդի շափման շղթան բաղկացած է հաջորդաբար միացված նմուշային կոճից և կոնդենսատորից, որոնք դրանվում են ռեզոնանսի մեջ: Փորձարկվող կոնդենսատորը միացվում է կոճին պուլսահեռ: Ցաղային շեղումը շղթայի ընդհանուր և ճյուղավորված մասի յարումների միջև հավասար է կոնդենսատորի կորուստների անկյանը, որը անմիջականորեն շափվում է էլեկտրոնային ֆազամետրի միջոցով: Փորձարկվող կոնդենսատորին ղուլպահեռ էլեկտրոնային վալումետրի միացումը հնարավորություն է տալիս շափել նաև անակոսթյունը:

Որոշված է առաջարկվող սխեմայի պաշտոնությունը և համեմատված ցաղապատկ կամրջակների պաշտոնության հետ: Ուսումնասիրված են սխեմայի սխառնմաստիկ և պատահական սխառները:

Շույց է տրված, որ ֆազաշղթայուն վերամետրի անկոսթյունը մեծացնում է շափվող շղթայի ճշտությունը փորձարկվող կոնդենսատորի շատ մեծ կորուստների դեպքում: Բերված են առաջարկվող սարքի փորձնական նմուշի ստուգման արդյունքները:

### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Каранетян М. А. Метод измерения емкостей конденсаторов низкой добротности. Электричество, № 8, 1968.
2. Карандеев К. В. Мостовые методы измерений. Гостехиздат, Киев, 1953.