

МОСТ ДЛЯ КОНТРОЛЯ МОДУЛЯ И ДОБРОТНОСТИ КОМПЛЕКСНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

М. С. РОЙТМАН

(Представлено научно-технической конференцией радиотехнического факультета)

В условиях массового контроля обычно представляет интерес не абсолютное значение измеряемой величины, а ее процентное отклонение от определенной номинальной величины, либо только установление отличия от установленного предела.

При этом наиболее целесообразно с точки зрения минимальных затрат времени применение прямопоказывающих приборов.

Ниже описывается относительно простой мост переменного тока, позволяющий проводить контроль величин отклонений модуля и аргумента проверяемого комплексного сопротивления Z_x от номинального значения Z .

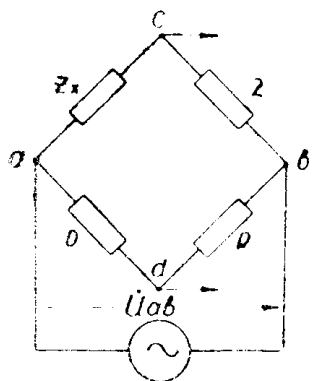


Рис. 1.

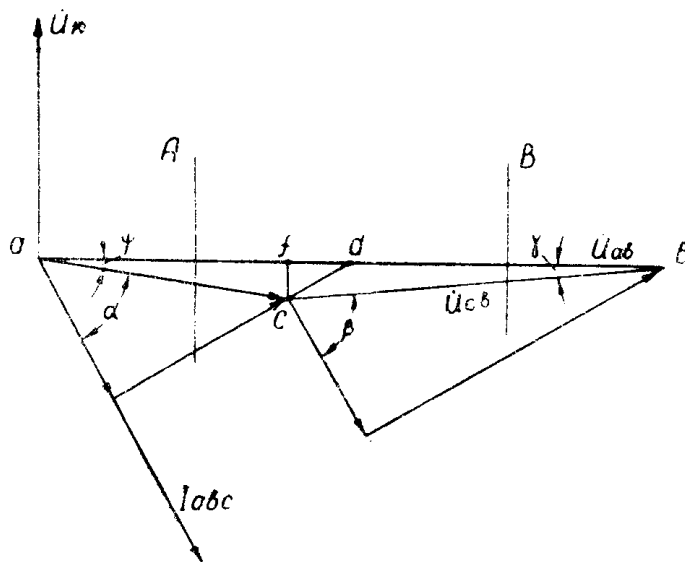


Рис. 2.

На рис. 1 приведена схема четырехлевого моста с включением проверяемого комплексного сопротивления Z_x и образцового Z в одну ветвь. Векторная диаграмма моста дана на рис. 2.

Величина Z_x может быть определена из сопоставления модулей напряжений U_{ac} и U_{cb} .

$$\frac{Z_x - Z}{Z} = \frac{\Delta Z}{Z} = \frac{U_{ac} - U_{cb}}{U_{cb}} \quad (1)$$

Если на выходе моста включен фазочувствительный указатель, вектор управляющего напряжения которого совпадает по направлению с вектором питающего мост напряжения \dot{U}_{ab} , то мы можем сравнивать проекции \dot{U}_{ac} и U_{cb} на \dot{U}_{ab} .

Вектор тока через ветвь abc сдвинут по отношению питающего мост напряжения U_{ab} на угол, определяемый сопротивлением ветви,

$$\dot{Z}_{abc} = Z_x e^{j\alpha} + Z e^{j\beta}$$

Если $\alpha_x = \beta$, то точка c будет находиться на прямой ab ; если же $\alpha_x \neq \beta$, то точка c будет выше или ниже этой прямой в зависимости от знака отклонения α_x от β .

Следовательно, при $\alpha \neq \beta$ контроль Z_x проводится с определенной погрешностью δ_M . Величина δ_M равна

$$\delta_M = \frac{(Z + \Delta Z) \cos \psi - Z \cos \gamma}{Z \cos \gamma} = \frac{(Z + \Delta Z) - Z}{Z}$$

Опуская промежуточные выкладки, вследствие их относительной громоздкости, получим

$$\delta_M \approx \frac{1}{4} \cdot \frac{\Delta Z}{Z} Q^2 \approx \frac{(Q_x - Q)^2}{4Q^4} \cdot \frac{\Delta Z}{Z} \quad (2)$$

где

$$\Theta = \psi - \beta = \alpha - \beta \approx \frac{Q_x - Q}{Q}$$

Например, для данных $\frac{\Delta Z}{Z} = 0,2$; $\frac{Q_x - Q}{Q} = 0,4$ и $Q = 4$
 $\delta_M \leq 0,05\%$.

Как видим, погрешность метода находится в допустимых пределах.

Общая погрешность сравнения Z_x с Z определяется также погрешностью измерения указателем напряжения ($U_{ac} \cos \psi - U_{cb} \cos \gamma$) и нестабильностью U_{ab} .

Следовательно, контроль Z_x непосредственным измерением разностного напряжения приводит к необходимости стабилизации напряжения питания моста и применению фазочувствительного указателя с допустимой погрешностью.

Выполнение указанных требований не вызывает особых затруднений, хотя и связано с определенным усложнением схемы прибора, что само по себе уже нежелательно.

Однако, решающим является то, что при контроле Z_x вышеуказанным способом весьма затруднительно проведение контроля добротности Q_x (при $Q > 5$) или малых значений аргумента.

Как уже указывалось, положение точки c будет выше или ниже прямой ab в зависимости от знака отклонения α от β . Повернув вектор управляющего напряжения указателя на 90° по отношению к \dot{U}_{ab} ,

можно проводить разбраковку комплексных сопротивлений по аргументу или по добротности.

Отношение величины проекции напряжения небаланса моста определяется зависимостью ($Z_x = Z$)

$$\frac{\operatorname{Re}j\dot{U}_{cd}}{U_{ab}} = \frac{1}{2} \operatorname{tg} \frac{\alpha - \beta}{2} = \frac{1}{2} \operatorname{tg} \Theta/2.$$

Изменение модуля Z_x на ΔZ приводит к появлению погрешности в определении величины Θ

$$\delta_{\Theta} \approx \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta Z}{Z} \right)^2.$$

Для данных $\Theta \approx 6^\circ$, $\frac{\Delta Z}{Z} = 0,2$ погрешность δ_{Θ} не превышает 1%.

Однако фазовая погрешность указателя φ приводит к погрешности проверки аргумента α

$$\Delta \Theta \approx \frac{\Delta Z}{Z} \varphi.$$

Минимальная же разность аргументов α и β должна быть больше $\Delta \Theta$. Откуда в грубом приближении получаем

$$\alpha - \beta = \frac{Q_r - Q}{Q^2} \approx \frac{\Delta Z}{Z} \cdot \varphi.$$

Например, при $Q = 10$, $\frac{\Delta Z}{Z} = 0,3$ и $\varphi = 3^\circ$ минимально различимое относительное изменение добротности больше 15%.

Однако если составляющую напряжения небаланса $\operatorname{Re}U_{cd}$ всегда сводить к малой величине, то точность контроля комплексных сопротивлений по добротности может быть резко повышена. Из рассмотрения векторной диаграммы моста (рис. 2) явственно следует, что $\operatorname{Re}U_{cd}$ может быть уменьшена и даже сведена к нулю перемещением точки d .

С целью „перемещения точки d “ можно применить двигатель. Но такое решение, к стати применяемое исключительно часто, обладает рядом существенных недостатков, основными из которых являются: малое быстродействие; ограниченный срок службы и малая надежность работы моста, вследствие наличия подвижных элементов; относительно большая сложность и стоимость.

Значительно лучше использовать для этой цели электрически управляемое сопротивление. В качестве последнего наиболее целесообразно применение фотосопротивления в сочетании с лампочкой накаливания.

При этом элементная схема устройства для разбраковки примет вид рис. 3.

Напряжение с выхода мостовой измерительной схемы подается на электронный усилитель 1. После усиления оно подается на фазочувствительные детекторы 2 и 5. Управляющее напряжение детектора 2 сдвинуто по отношению к вектору напряжения питания моста U_{ab} на 90° фазосдвигающей цепью 3.

Управляющее напряжение детектора 5 совпадает по фазе с U_{ab} .

Таким образом, напряжение на выходе фазочувствительного детектора 2 определяется проекцией \dot{U}_{cd} на \dot{U}_k , т. е. добротностью Q_x , а на выходе детектора 5 — проекцией \dot{U}_{cd} на U_{ab} , т. е. модулем Z_x .

Уменьшение напряжения $Re\dot{U}_{cd}$ достигается тем, что напряжение $\kappa Re\dot{U}_{cd}$ с выхода детектора 5 подается в цепь обратной связи 7, которая и регулирует положение точки d .

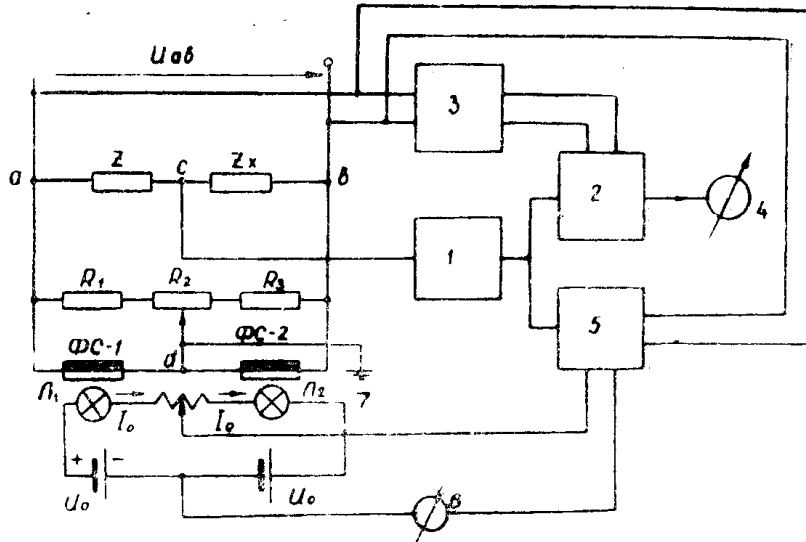


Рис. 3.

По существу мы имеем статическую систему авторегулирования положения точки d . Пусть, например, $Z_x < Z$. На выходе детектора 5 появится напряжение $\kappa Re\dot{U}_{cd}$, вызывающее в цепи 7 ток I_y . При этом через лампочку L_1 будет протекать ток $I_0 + \frac{1}{2} I_y$, а через L_2 — $I_0 - \frac{1}{2} I_y$. Сопротивление ФС-1 уменьшится, а ФС-2 увеличится. Точка d переместится к точке f (рис. 2). В результате проекция вектора напряжения небаланса на вектор \dot{U}_{ab} станет равной $\frac{Re\dot{U}_{cd}}{K_{\text{сист.}}}$, где $K_{\text{сист.}}$ — общий коэффициент усиления системы авторегулирования.

Поскольку величина $\frac{Re\dot{U}_{cd}}{K_{\text{сист.}}}$ может быть доведена до весьма малой величины, то точность контроля Q_x при этом практически ограничивается лишь относительной чувствительностью S' указателя.

Величина тока I_y является функцией $\frac{\Delta Z}{Z}$, а направление тока I_y позволяет судить о знаке отклонения модуля проверяемого комплексного сопротивления от номинального значения. Следовательно, измеряя электроизмерительным прибором 6 ток в цепи обратной связи 7, мы можем судить о величине Z_x .

Погрешность измерения Z_x равна

$$\delta_z = \sqrt{\left(\frac{Re\dot{U}_{cd}}{U_{ab}K_{\text{сист.}}} \cdot \frac{\Delta Z}{Z}\right)^2 + \left(\varphi \frac{Rej\dot{U}_{cd}}{U_{ab}}\right)^2 + \left(\delta_s \frac{\Delta Z}{Z}\right)^2 + \delta_M^2 + \delta_{\text{ФС}}^2} \approx$$

$$\approx \sqrt{\left(\varphi \frac{Q_x - Q}{4Q^2}\right)^2 + \left(\delta_6 \frac{\Delta Z}{Z}\right)^2} = \delta_{\text{М}}^2 + \delta_{\text{ФС}}^2, \quad (4)$$

где φ — погрешность вектормерного указателя по углу

$$(\varphi \approx 2 : 3);$$

δ_6 — погрешность электроизмерительного прибора 6

$$(\delta_6 \approx 1,5 \%);$$

$\delta_{\text{М}}$ — погрешность метода измерения Z_x ; (2);

$\delta_{\text{ФС}}$ — погрешность от нестабильности светового потока лампочек накаливания и сопротивления ФС.

Лампочки накаливания и фотосопротивления (после предварительной тренировки в течение 200–300 часов) обладают высокой стабильностью параметров. По предварительным данным, изменения параметров лампочек накаливания СН-3 и фотосопротивлений ФС-К2Н (шунтирующие сопротивления R_1 и R_3 отсутствовали) за 50 часов непрерывной работы при нестабильности U_0 , равной 0,1 %, приводили к напряжению небаланса $Re\dot{U}_{cd}$, соответствующему $\frac{\Delta Z}{Z} = 0,1 \%$.¹⁾

$$\text{При } Q \gg 4, \quad \frac{Q_x - Q}{Q} = |0,4|; \quad \frac{\Delta Z}{Z} = |0,2|, \quad \delta_2 < 0,5 \%.$$

Таким образом, описанный выше относительно простой мост позволяет с высокой точностью проводить контроль добротности и модуля комплексного сопротивления.

Следует указать, что в случае необходимости регистрации отклонений модуля Z_x от Z , в качестве измерителя 6 может быть применен самопишущий миллиамперметр.

Благодаря указанным выше достоинствам и отсутствию в мосте движущихся элементов он может найти широкое применение в контрольно-измерительной технике и автоматике.

¹⁾ При необходимости контролировать малые относительные изменения Z_x от Z фотосопротивления можно шунтировать малыми сопротивлениями R_1 и R_3 и нестабильность схемы соответственно уменьшится.