

С. М. КАЗАКОВ, К. М. СОБОЛЕВСКИЙ
(Новосибирск)

К ВОПРОСУ ОБ ИЗМЕРЕНИИ ОТНОШЕНИЙ КОМПОНЕНТ КОМПЛЕКСНЫХ ВЕЛИЧИН ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫМИ ЦЕПЯМИ УРАВНОВЕШИВАНИЯ

Как известно, к числу актуальных задач современной измерительной практики относится одновременное измерение одной из компонент пассивной комплексной величины и их отношения. При достаточно высоких требованиях к точности измерения указанная задача решается обычно с помощью мостовых или компенсационно-мостовых цепей, уравниваемых по измеряемому компоненте и отношению компонент [1—6]. Покажем, однако, что в настоящее время такое уравнивание вряд ли всегда целесообразно, поскольку технически более просто необходимая точность измерения отношения компонент может быть достигнута путем уравнивания цепи по обеим компонентам с вычислением их отношения при помощи простейших делительных устройств.

В самом деле, уравнивание цепи по измеряемому компоненте и отношению компонент не представляет особых трудностей лишь при значениях отношения, много меньших единицы; при значениях же, близких к единице, такое уравнивание связано с существенными затруднениями, обусловленными малым углом сходимости [1] и непостоянством чувствительности цепи [7]. Неравенство угла сходимости его идеальному значению $\left| \frac{\pi}{2} \right|$ требует для точного уравнивания цепи вводить различные осложнения (например, «ортокуль» [8] или специальную модуляцию [9]). Что же касается непостоянства чувствительности, являющегося, как нетрудно убедиться, принципиальным свойством цепей, уравниваемых по отношению компонент, то оно также значительно затрудняет точное уравнивание цепи (в особенности — дискретное); действительно, легко показать (используя методику, предложенную в [10]), что даже в идеальном фазовом режиме измерения абсолютная чувствительность устройства уравнивания к параметру p_y , уравнивающей цепь по отношению компонент p_n , имеет вид

$$|S_n|_{ij=0} = (1 + p_0^2)^{-1},$$

где $p_0 = Kp_y$ — образцовое отношение компонент, т. е. чувствительность S_n практически постоянная только при $p_0^2 \ll 1$ а при $p_0 \approx 1$ ее изменение становится значительным.

Указанные затруднения исключаются, если для измерения одной из компонент и их отношения использовать цепь, уравниваемую по обеим компонентам, вычисляя их отношение с помощью делительного устройства. Достоинства такого хорошо известного и естественного пути решения рассматриваемой задачи заключается в простоте процесса уравнивания цепи, а также, как будет показано ниже, в простоте самой цепи, в возможности обеспечения постоянства чувствительности S_n , в обеспечении практически одновременного отсчета трех параметров измеряемой комплексной величины и в возможности отсчета любого отношения. Конечно, при использовании классических четырехплечих и многоплечих мостов, даже и с дискретным уравниванием, выполнение операции деления вызвало значительное усложнение измерительного устройства в целом, в связи с чем этот путь на практике не применялся. Однако в настоящее время положение изменилось. Усовершенствование мостовых цепей привело к созданию трансформаторных цепей [11], уравниваемых переключением витков трансформатора напряжения, и автокомпенсационных цепей [3]. Для таких цепей в момент равновесия характерно наличие активных величин (напряжений или токов), пропорциональных одной или обеим измеряемым компонентам, и поэтому реализация делительного устройства в таких цепях уже не представляет никаких трудностей: достаточно активную величину, пропорциональную компоненте, которая является числителем измеряемого отношения, подать на 4-полосник, коэффициент передачи которого K_0 регулируется синхронно с параметром p_{y2} , уравнивающим цепь по второй компоненте и равным $K_0 = \frac{K_1}{p_{y2}}$. Измеряемое отношение отсчитывается при этом по модулю активной величины на выходе регулируемого 4-полосника.

Объясним сказанное на примере двойного трансформаторного моста для измерения S_n , g_n и $\text{tg } \delta_n$ комплексных проводимостей (рис. 1). Уравнивание цепи по емкости производится переключением витков обмотки n_2 , а по g_n — переключением

витков обмотки n_3 трансформатора напряжения ТН₁. В момент равновесия справедливы равенства:

$$C_{н} = \frac{n_2 m_2}{n_1 m_1} C_0; \quad g_{н} = \frac{n_3 m_3}{n_1 m_1} g_0; \quad \dot{U}_3 = \frac{n_1 m_1 g_{н}}{n_0 m_3 g_0} \dot{E}_3.$$

Для отсчета параметра $\operatorname{tg} \delta_{н} = g_{н}/\omega C_{н}$ использован вспомогательный трансформатор напряжения ТН₂, витки p_1 первичной обмотки которого переключаются пропорционально виткам n_2 . Приняв для простоты $p_1 = n_2$, получим

$$\dot{U}_1 = \frac{p_2}{p_1} \dot{U}_3 = \frac{m_2 p_2}{n_0 m_3} \frac{\operatorname{tg} \delta_{н}}{\operatorname{tg} \delta_0} \dot{E}_3,$$

где $\operatorname{tg} \delta_0 = g_0/\omega C_0$. Очевидно, что, переключая одновременно с выбором пределов по $C_{н}$ и $g_{н}$ обмотки в регулируемом трансформаторном 4-полюснике, легко обеспечить изменение напряжения U_1 только в пределах одного порядка (например, 1–10 в). При этом использование даже стрелочного прибора позволяет обеспечить достаточно высокую точность измерения отношения компонент исследуемой комплексной величины. Принимая следующие значения основных составляющих погрешности измерения: погрешность от нестабильности источника питания $\approx 0,2\%$, погрешность выпрямления $\approx 0,3\%$ и погрешность стрелочного прибора $\approx 0,5\%$, получим суммарную погрешность $\approx 1,5\%$, что для измерения $\operatorname{tg} \delta_{н}$ вполне допустимо. Интересно заметить, что абсолютная погрешность по $\operatorname{tg} \delta_{н}$ в таких цепях, благодаря очень точному уравниванию цепи по $C_{н}$ и $g_{н}$, может быть существенно ниже, чем в цепях, уравниваемых по $\operatorname{tg} \delta_{н}$.

Поскольку отношение компонент является скорее контролируемым параметром, чем измеряемым (особенно в производстве), то необходимости его отсчета в цифровом виде, как правило, нет. При проведении же научных экспериментов необходима либо фиксация результата измерения в графическом виде, либо передача информации на расстояние и ввод в ЭВМ; в обоих последних случаях вывод измерительной информации в виде постоянного напряжения является предпочтительным.

Очевидно, что уравнивание мостовой цепи коммутацией витков трансформатора напряжения по обоим компонентам не обязательно. Уравнивание по компоненте, находящейся в знаменателе измеряемого отношения, может производиться и изменением образцовой меры или витков компаратора токов КТ.

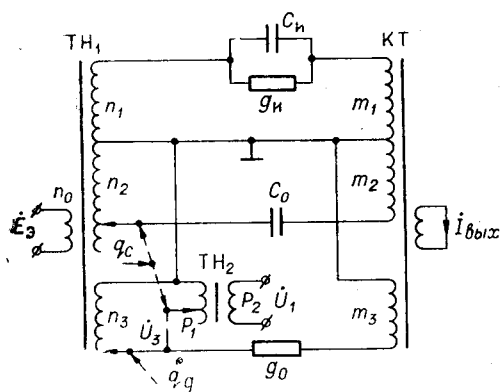


Рис. 1.

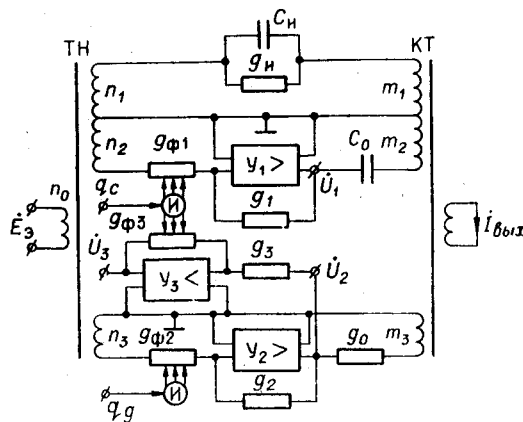


Рис. 2.

Особенно целесообразным является применение делительных устройств в уравниваемых автокомпенсационных мостах. Так, на рис. 2 в качестве примера приведена схема автокомпенсационного моста для измерения $C_{н}$, $g_{н}$ и $\operatorname{tg} \delta_{н}$, уравниваемого по $C_{н}$ и $g_{н}$ с помощью фотопроводимостей $g_{ф1}$ и $g_{ф2}$. Операция деления выполняется путем включения фотопроводимости $g_{ф3}$, освещаемой идентично с $g_{ф1}$. В цепь обратной связи усилителя Y_3 , на вход которого подается ток, пропорциональный активной проводимости $g_{н}$. При условии, что $g_{ф3} = K g_{ф1}$, в состоянии равновесия получим равенства:

$$U_1 = \frac{n_1 m_1}{n_0 m_2} \frac{C_{н}}{C_0} E_3; \quad U_2 = \frac{n_1 m_1}{n_0 m_3} \frac{g_{н}}{g_0} E_3; \quad U_3 = \frac{n_2 m_2}{n_0 m_3} \frac{g_3}{g_1} \frac{\operatorname{tg} \delta_{н}}{\operatorname{tg} \delta_0} E_3.$$

Кроме перечисленных выше общих достоинств, такая цепь по сравнению с цепями, рассмотренными в [12, 13], обеспечивает большую точность измерения, благодаря тому, что усилитель U_3 в контур уравнивания не входит и поэтому его фазовые сдвиги на точность измерения не влияют.

Приведенные примеры цепей достаточно наглядно показывают простоту измерения отношения компонент путем деления результатов измерения компонент исследуемой комплексной величины. Можно добавить, что подобные делительные устройства легко реализуются также и в мостовых цепях для измерения параметров комплексных сопротивлений, уравниваемых изменением компонент напряжения, питающего исследуемый объект [14].

В заключение необходимо подчеркнуть, что авторы ни в коей мере не претендовали на подробное рассмотрение всех возможных вариантов выполнения делительного устройства, которых, очевидно, может быть весьма много. Основная цель данного сообщения — обратить внимание разработчиков измерительной аппаратуры на рациональность измерения компонент комплексной величины и их отношения с помощью цепей, уравниваемых по компонентам.

ЛИТЕРАТУРА

1. К. Б. Карандеев. Мостовые методы измерений. Киев. Гостехиздат УССР, 1953.
2. Ф. Б. Гриневич. Автоматические мосты переменного тока. Новосибирск, РИО СО АН СССР, 1964.
3. Ф. Б. Гриневич, Е. Е. Добров, К. Б. Карандеев. Автокомпенсационные мостовые цепи.— *Автометрия*, 1965, № 5.
4. Ф. Б. Гриневич, А. В. Чеботарев. Измерительная цепь цифрового автоматического моста переменного тока.— *Автометрия*, 1966, № 3.
5. К. Б. Карандеев, Ф. Б. Гриневич, К. М. Соболевский, Б. Н. Панков. Цифровой мост с индуктивно связанными плечами для измерения параметров комплексных сопротивлений. Авт. свидетельство № 194947.— ИПОТЗ, 1967, № 9.
6. Ф. Б. Гриневич, К. М. Соболевский, М. А. Ахмаметьев, Е. Е. Добров, С. М. Казаков. Автокомпенсационный мост переменного тока. Авт. свидетельство № 221155.— ИПОТЗ, 1968, № 21.
7. Ф. Б. Гриневич, К. Б. Карандеев, К. М. Соболевский. Об измерении параметров катушек индуктивности мостами с дискретным уравниванием.— *Автометрия*, 1967, № 4.
8. H. P. Hall. Orthonull — eine Anordnung zum Brückenabgleich.— *Electr. Rundschau*, 1960, № 1.
9. Ф. Б. Гриневич. Квазиэкстремальные автоматические модуляционные мосты переменного тока.— *Автометрия*, 1968, № 1.
10. С. М. Казаков, К. М. Соболевский, В. Н. Сумительнов. Указатели измерительных состояний цепей уравнивания.— *Автометрия*, 1968, № 6.
11. А. Л. Грохольский, К. М. Соболевский. Трансформаторные измерительные мосты.— *Автометрия*, 1965, № 1.
12. М. А. Ахмаметьев, Ф. Б. Гриневич, Е. Е. Добров, С. М. Казаков, К. М. Соболевский. О новых измерительных автокомпенсационных цепях.— Расширенные тезисы докл. научно-технического совещания «Совершенствование устройств для измерения комплексных параметров и величин в широком диапазоне частот». Киев, 1968.
13. М. А. Ахмаметьев, Е. Е. Добров, Ю. Я. Шагалов. Автокомпенсационный измерительный преобразователь « C , $\text{tg } \delta$, R — напряжение». — Тезисы докладов IX Всесоюзной конференции по автоматическому контролю и методам электрических измерений. Новосибирск, 1968.
14. R. Calvert, J. Mildwater. Англ. патент, кл. G1 v (G01 г), № 1049933, заявл. 26/III 1965, опубл. 30/XI 1966 г.

Поступило в редакцию
18 сентября 1968 г.