

## ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ЦЕПИ

УДК 621.317.733.025

В. Е. БУТТ, Б. Н. ПАНКОВ

(Новосибирск)

### К ИССЛЕДОВАНИЮ ПРОЦЕССА УРАВНОВЕШИВАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МОСТОВ

Исследование процесса уравнивания мостовой измерительной цепи необходимо для выявления ее качественных характеристик и особенностей. Для трансформаторных мостов, получивших в настоящее время широкое распространение, этот вопрос изучен еще недостаточно полно. По-видимому, наиболее обстоятельной можно считать работу [1], где по методике, предложенной в [2], исследованы процессы уравнивания трансформаторных мостов с двумя парами плеч отношений для случая, когда входное сопротивление указателя принимается бесконечно большим. В последнее время трансформаторные мосты широко используются в режиме, когда поток в сердечнике компаратора токов поддерживается близким к нулю в течение всего процесса уравнивания. Достигается это или с помощью усилителей, соответствующим образом связанных с обмотками компаратора токов (см., например, [3]), или шунтированием индикаторной обмотки компаратора малыми по величине сопротивлениями [4]. При этом исключается взаимное влияние сравниваемых токов [5], а полные сопротивления обмоток компаратора определяются только их активными сопротивлениями.

Ниже проводится анализ процесса уравнивания трансформаторных измерительных мостовых цепей, у которых компаратор токов находится в режиме короткого замыкания.

Исследуемые измерительные цепи с одной и двумя парами плеч отношений изображены на рис. 1 и 2, где для обеих схем  $U$  — источник напряжения с малым выходным сопротивлением;  $Y$  — указатель равновесия со сколь возможно малым входным сопротивлением; КТ — индуктивный компаратор токов; ТН — трансформатор напряжения; исследуемое  $Z_x$  и образцовое  $Z_0$  — комплексные сопротивления одинакового

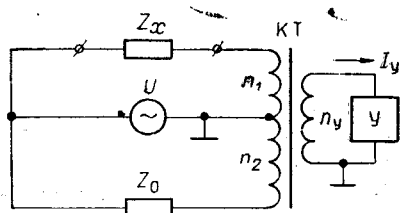


Рис. 1.

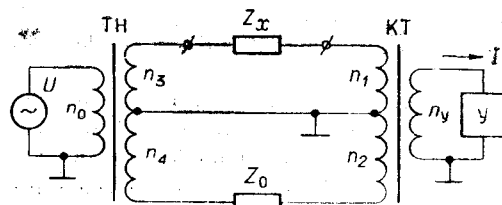


Рис. 2.

характера, представляемые последовательной или параллельной схемами замещения. При коэффициенте связи между обмотками ТН и КТ, равном единице, и пренебрежимо малых остаточных параметрах обмоток очевидны следующие соотношения:

$$\text{для цепи рис. 1} \quad \frac{\dot{U}}{Z_x} n_1 - \frac{\dot{U}}{Z_o} n_2 = \dot{I}_y n_y;$$

$$\text{для цепи рис. 2} \quad \frac{\dot{U}}{Z_x} \frac{n_1 n_3}{n_o} - \frac{\dot{U}}{Z_o} \frac{n_2 n_4}{n_o} = \dot{I}_y n_y.$$

Состояние мостовой измерительной цепи удобно характеризовать некоторой векторной величиной  $W$ , являющейся в большинстве случаев дробно-линейной функцией комплексной переменной [6]

$$W = \frac{aZ + b}{cZ + d}. \quad (1)$$

Если для рассматриваемого случая обозначить через  $W$  магнитодвижущую силу  $\dot{I}_y n_y$ , то

$$\text{для цепи рис. 1} \quad W = \dot{U} \frac{n_1 Z_o - n_2 Z_x}{Z_x Z_o};$$

$$\text{для цепи рис. 2} \quad W = \frac{\dot{U}}{n_o} \frac{n_1 n_3 Z_o - n_2 n_4 Z_x}{Z_x Z_o}, \quad (2)$$

т. е. для данного случая  $W$  имеет вид

$$W = \frac{aZ_o + b}{cZ_o}. \quad (3)$$

Рассмотрим траектории движения конца вектора  $W$  в положении, далеко от равновесия ( $W \neq 0$ ), при уравнивании мостовой цепи регулировкой образцовых мер и изменением количеств витков обмоток трансформаторов.

При последовательном соединении сопротивлений в образцовой ветви  $W$  является функцией комплексной переменной  $Z_o = R_o \pm jX_o$ . Согласно [7], при изменении одного из элементов цепи, состоящей из последовательно соединенных активного сопротивления и реактивности, диаграммой изменения полного сопротивления является прямая линия. Так как годограф комплексной переменной  $Z_o$  — прямая линия, то траекториями конца вектора  $W$  будут окружности или в частном случае прямые. Из [8] известно, что функция (1) при условии  $ad - bc \neq 0$  преобразует прямые, не проходящие через точку  $Z = -\frac{d}{c}$ , в окружности, а прямые, проходящие через эту точку, в прямые. Поэтому для уравниваемого моста при последовательно соединенных переменных образцовых элементах линиями уравнивания являются окружности. При уравнивании мостовой цепи только по одному параметру, при втором параметре, равном нулю, что соответствует прохождению диаграммы изменения  $Z_o$  через нуль, линией уравнивания является прямая.

Диаграммой изменения полного сопротивления цепи из параллельно соединенных активного сопротивления и реактивности при изменении параметра одного из элементов цепи является окружность, проходящая через начало координат [7]. При этом, согласно [8], функция (1) преобразует окружности, не проходящие через точку  $Z = -\frac{d}{c}$ , в

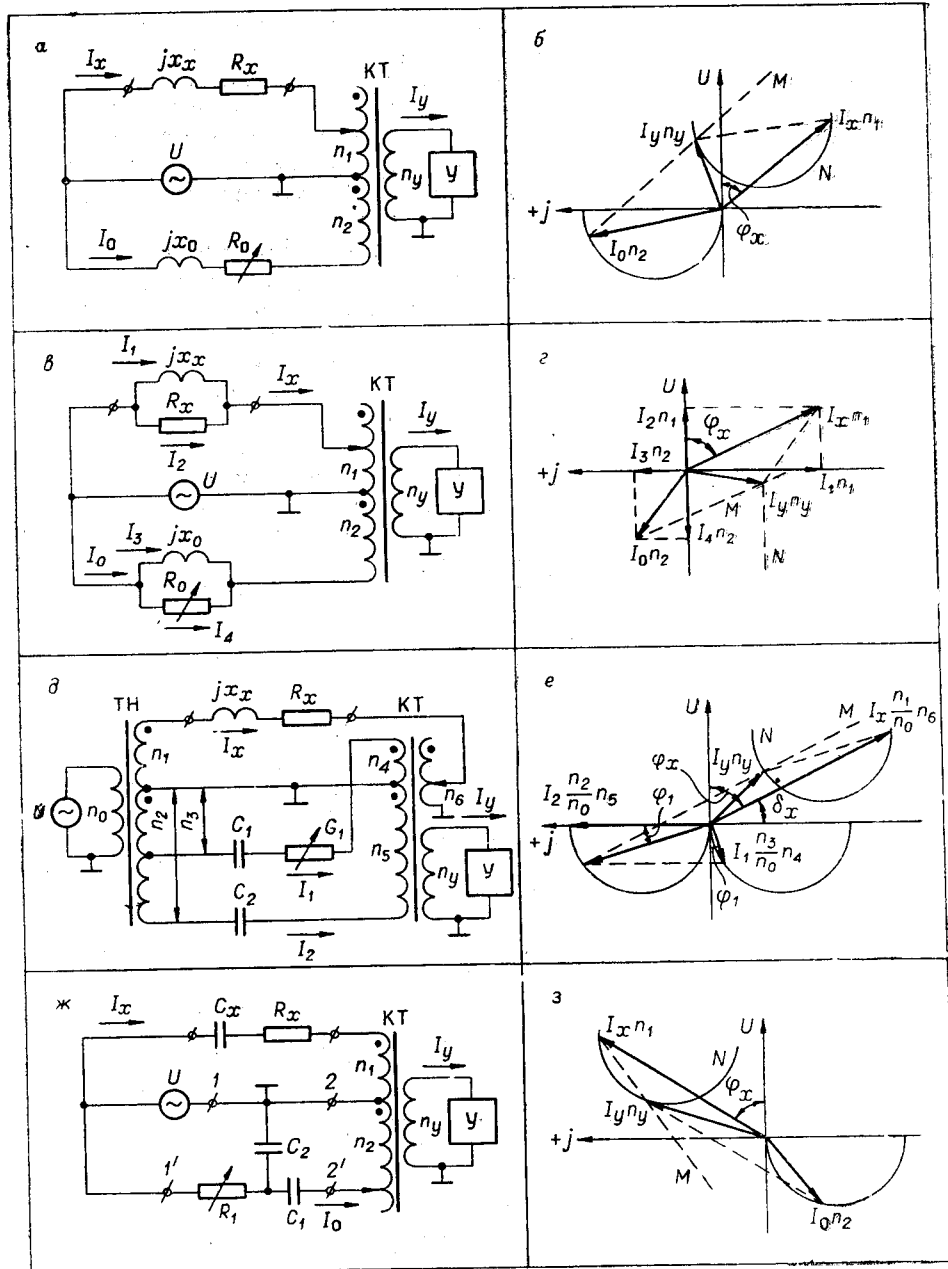
окружности, а проходящие через эту точку — в прямые линии. Точкой  $Z = -\frac{d}{c}$  в нашем случае [см. (3)] является  $Z=0$ , а полное сопротивление параллельной цепи, принятое за комплексную переменную в уравнении (3), изменяется, как указывалось выше, по окружности, проходящей через начало координат. Поэтому для трансформаторных мостов с образцовыми ветвями, состоящими из параллельно соединенных активного и реактивного сопротивлений, при уравнивании изменением образцовых мер линиями уравнивания являются прямые [9].

Такое отличие в характере линий уравнивания при последовательном или параллельном соединении образцовых элементов является спецификой трансформаторных мостов в указанном выше режиме, поскольку для цепей рис. 1 и 2 в уравнении (3) коэффициент  $d$  всегда равен нулю.

Если же уравнивающими параметрами являются числа витков обмоток индуктивно связанных плеч, то, как это видно из рассмотрения уравнений (2), независимо от того, находятся эти витки на индуктивном компараторе токов или на трансформаторе напряжения, линиями уравнивания будут прямые. Причем это справедливо как при параллельной, так и при последовательной схемах замещения  $Z_0$ .

Рассмотренные общие положения проиллюстрируем на конкретных примерах построения диаграмм уравнивания для нескольких известных цепей (см. таблицу). Диаграммы строим по методу обращения кривых в комплексной плоскости [7]. При этом для каждой ветви моста строится на комплексной плоскости диаграмма изменения полного сопротивления, которая после обращения относительно начала координат становится диаграммой проводимости, а в некотором масштабе и диаграммой тока. Масштаб тока можно выбрать таким, что диаграммы проводимости и тока совпадут [7]. В дальнейшем будем считать это условие всегда выполненным. В таблице,  $a$ — $г$  приведены диаграммы уравнивания и схемы мостов с одной парой плеч отношения для случая измерения индуктивности и тангенса угла потерь катушек индуктивности. Исследуемое сопротивление представлено последовательной (см. таблицу,  $a$ ) или параллельной (см. таблицу,  $в$ ) схемами замещения. Соответственно этому также включены и образцовые меры. Уравнивание по индуктивности осуществляется изменением чисел витков  $n_1$ , а уравнивание по тангенсу угла потерь изменением образцового сопротивления  $R_0$ ;  $M$  и  $N$  — соответственно линии уравнивания по индуктивности и тангенсу угла потерь. Вид этих линий подтверждается выводами, сделанными выше. Изменение направления включения какой-либо обмотки компаратора токов соответствует повороту на  $\pm\pi$  относительно начала координат диаграмм токов, протекающих через эту обмотку. Изменение же чисел витков приводит к пропорциональному изменению модулей векторов магнитодвижущих сил.

Построение линий уравнивания для трансформаторных мостов с двумя парами плеч отношений в принципе не отличается от построения линий уравнивания мостов с одной парой плеч отношения. Необходимо лишь дополнительно учитывать, что ветви моста питаются различными напряжениями. Для моста рис. 2 векторы магнитодвижущих сил необходимо умножить на коэффициенты  $\frac{n_i}{n_0}$ , где  $n_i$  — количество витков вторичной обмотки трансформатора ТН. Изменение направления включения обмотки трансформатора напряжения также соответствует повороту диаграмм относительно начала координат на  $\pm\pi$ . При перемене мест источника напряжения и указателя равновесия изме-



няются лишь коэффициенты у векторов магнитодвижущих сил, а общий вид диаграмм не изменяется.

Аналогично строятся и диаграммы для мостов, у которых образцовые элементы образуют несколько ветвей. В таблице, *д*, *е* приведены диаграмма уравнивания и схема моста [10] для измерения индуктивности и тангенса угла потерь катушек индуктивности. При выполнении условия  $C_2 n_2 n_5 = C_1 n_3 n_4$  по проводимости  $G_1$  отсчитывается тангенс угла потерь  $\operatorname{tg} \delta_x$  исследуемой катушки. При равновесии этот угол равен фазовому углу  $\varphi_1$  цепи из последовательно соединенных конденсатора  $C_1$  и проводимости  $G_1$ . Индуктивность отсчитывается по отношению чисел витков трансформаторов и величине образцовой емкости  $C_2$ ;  $M$  и  $N$  — соответственно линии уравнивания по индуктивности и тангенсу угла потерь.

В случае, когда не все токи, протекающие через образцовые меры, участвуют в создании суммарной магнитодвижущей силы, можно для построения линий уравнивания использовать диаграммы для четырехполюсников. В качестве примера в таблице, *ж* представлена схема моста для измерения параметров конденсаторов [11]. Здесь для уравнивания моста по  $\operatorname{tg} \delta$  включена дополнительная емкость  $C_2$ , ток через которую не протекает по обмоткам компаратора. Для построения диаграммы изменения тока  $I_0$  выделяется четырехполюсник, к входным зажимам  $1$  и  $1'$  которого подключен источник напряжения  $U$ , а выходные зажимы  $2$  и  $2'$  замкнуты накоротко. Известными способами [7] строится диаграмма изменения тока  $I_0$  при изменении сопротивления  $R_1$ . Общий вид линий уравнивания для этого моста приведен в таблице, *з*.

Таковыми же способами можно построить диаграммы уравнивания и для более сложных трансформаторных мостов с компараторами токов в режиме короткого замыкания или же с другими векторными указателями, в которых сравниваемые токи не оказывают взаимного влияния.

С использованием изложенного выше остановимся на возможности осуществления условий отдельного отсчета измеряемых параметров в трансформаторных измерительных цепях.

Раздельный отсчет очень удобен при работе с мостовой цепью и к осуществлению его условий всегда стремятся при разработке новых измерительных цепей. Как известно [12], при раздельном отсчете и независимой регулировке уравнивающих параметров линии уравнивания по этим параметрам должны совпадать с линиями уравнивания по соответствующим параметрам измеряемого комплексного сопротивления. При измерении по последовательной схеме замещения (обычно измеряют индуктивность или емкость и тангенс угла потерь) исследуемый объект можно представить как реактивность, последовательно соединенную с переменным активным сопротивлением, или, наоборот, как активное сопротивление, соединенное с переменной реактивностью. И в том и в другом случае, согласно [7], диаграммой изменения полной проводимости является окружность.

Таким образом, на основании выводов о характере линий уравнивания можно заключить, что при последовательной схеме замещения исследуемого объекта уравновесить мост при обеспечении условий раздельного отсчета можно изменением или пассивных образцовых мер, или образцовых мер и чисел витков обмоток трансформаторов. Уравновесить мост только изменением чисел витков обмоток при раздельном отсчете измеряемых параметров можно лишь при параллельной схеме замещения исследуемого объекта. Это справедливо для случаев построе-

4. Ю. В. Братусь, В. П. Карпенко, И. С. Сериков. Схемы мостов с тесной индуктивной связью между плечами для измерения параметров феррокатушек.— Методы и аппаратура для измерения электрических и магнитных величин. Киев, «Наукова думка», 1966.
5. В. А. Хомяк. Способ измерения тока посредством дифференциального трансформатора. Авт. свидетельство № 150171.— Бюллетень изобретений, 1962, № 18.
6. К. Б. Карандеев, Г. А. Штамберггер. Обобщенная теория мостовых цепей переменного тока. Новосибирск, Изд-во СО АН СССР, 1961.
7. Л. Р. Нейман, П. Л. Калантаров. Теоретические основы электротехники. ч. II. М.—Л., Госэнергоиздат, 1959.
8. М. А. Лаврентьев и Б. В. Шабат. Методы теории функций комплексного переменного. М., «Наука», 1965.
9. Ю. В. Братусь, В. П. Карпенко, И. С. Сериков. Сходимость мостовых схем с индуктивными компараторами тока.— Методы и аппаратура для измерения электрических и магнитных величин. Киев, «Наукова думка», 1966.
10. К. М. Соболевский, Б. Н. Панков. Мост с индуктивно связанными плечами для измерения параметров катушек индуктивности. Авт. свидетельство № 178897.— ИПОТЗ, 1966, № 4.
11. В. П. Шульц, В. Е. Бутт. Мост переменного тока для измерения параметров конденсаторов. Авт. свидетельство № 160756.— Бюллетень изобретений, 1965, № 1.
12. К. Б. Карандеев, Р. С. Кравцов. О связи между углом сходимости моста переменного тока и условиями раздельного отсчета.— Доклады Львовского политехнического института, 1958, т. II, вып. 2.
13. R. Calvert, I. Mildwater. Improvements in or relating to electrical bridges. Англ. патент кл. GIU (G01r) № 1049933, заявл. 26.03.65, опубл. 30.11.66.

*Поступила в редакцию  
8 апреля 1968 г.*