

ЦИФРОВЫЕ ПРИБОРЫ И УСТРОЙСТВА

УДК 621.317.733.011.4 : 621.319.4

Т. Н. МАНТУШ, Б. Н. ПАНКОВ
(Новосибирск)

О ПОСТРОЕНИИ ЦИФРОВЫХ ПРОЦЕНТНЫХ МОСТОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ КОНДЕНСАТОРОВ ПО ДВУМ ПАРАМЕТРАМ

Приборы и устройства, используемые в настоящее время для контроля емкости и тангенса угла потерь конденсаторов, не обеспечивают надлежащей точности и скорости контроля. Для определения классов точности конденсаторов по емкости применяют приборы, в том числе и мосты переменного тока [1], имеющие погрешность 1—0,5%. Отсчет отклонений емкости от номинала в таких приборах нередко производится по непрерывным шкалам, проградуированным в процентах, что в условиях массового контроля является серьезным недостатком.

Контроль емкости и тангенса угла потерь из-за отсутствия надлежащей аппаратуры во многих случаях приходится выполнять на различных установках, вследствие чего увеличивается длительность контроля и возрастает его стоимость.

Более высокие метрологические и эксплуатационные характеристики имеют цифровые процентные мосты, в особенности мосты, построенные на основе измерительных цепей с тесной индуктивной связью. С помощью таких цепей нетрудно обеспечить высокую точность контроля емкости и тангенса угла потерь в широких пределах их номинальных значений, причем оба параметра можно контролировать одновременно.

В известном автоматическом процентном мосте с тесной индуктивной связью [2, 3], предназначенном для контроля конденсаторов только по одному параметру (емкости), процентное отклонение емкости от заданного номинала определяется в процессе дискретного уравнивания измерительной цепи с помощью одной из обмоток компаратора токов. Во время уравнивания переключаются витки этой обмотки. Номинал емкости устанавливается по количеству витков обмоток трансформатора напряжения. Благодаря тому, что переменными параметрами в измерительной цепи являются только числа витков плечевых обмоток, точность такой цепи может быть весьма высокой, а количество образцовых мер оказывается минимальным.

Однако на основе такого моста, имеющего только две пары плеч отношения, невозможно создать процентный прибор для контроля конденсаторов по двум параметрам, в котором изменением витков обеспечивалась бы отдельная установка номиналов емкости и тангенса угла потерь независимо от витков, изменяемых в процессе уравнивания. Можно при этом использовать набор дополнительных образцовых мер,

однако такой способ построения процентного моста нельзя считать удачным.

Для создания моста, позволяющего производить одновременный контроль емкости и тангенса угла потерь при условии, что переменными параметрами измеряемой цепи являются только числа витков плечевых обмоток, необходимы, как минимум, три пары плеч отношения. Уравновешивание моста во многих случаях достаточно производить только по емкости, поскольку контроль тангенса угла потерь обычно состоит в получении результата «больше» или «меньше» относительно устанавливаемого номинала, а это можно сделать весьма точно по сигналу остаточного неравновесия после уравновешивания по емкости [4]. В качестве указателей равновесия могут быть использованы, например, фазочувствительные детекторы.

Рассмотрим некоторые схемы таких мостов с тремя парами плеч отношения. На рис. 1 приведена схема измерительной цепи процентного моста с двумя трансформаторами напряжения $ТН_1$, $ТН_2$ и компаратором токов $КТ$. Контролируемый конденсатор представлен по параллельной схеме замещения с параметрами C_x и R_x . Числа рабочих витков трансформаторов напряжения и компаратора токов обозначены соответственно: n , n_1 , n_2 , n_3 , m_1 , m_2 , p_1 , p_2 , p_3 ; обмотка, подключаемая к указателю равновесия, имеет число витков p_v . В качестве образцовых мер используются конденсатор C_0 и сопротивление R_0 . Цепь питается источником синусоидального напряжения.

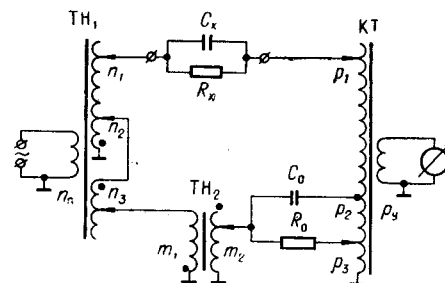


Рис. 1.

Входное сопротивление усилителя сигнала небаланса для рассматриваемых цепей целесообразно выбирать очень малым. При этом сигналом небаланса моста будет ток в выходной обмотке компаратора токов. Усилитель с очень малым сопротивлением позволяет получить для параллельной схемы замещения контролируемого конденсатора отдельное уравновешивание моста по емкости, исключить влияние параметров компаратора токов на составляющие сигнала небаланса и повысить тем самым точность контроля.*

При условии, что между обмотками трансформаторов напряжения и компаратора токов имеется тесная индуктивная связь, а активные сопротивления этих обмоток совместно с входным сопротивлением усилителя сигнала небаланса имеют пренебрежимо малые значения, магнитный поток в сердечнике компаратора токов можно считать равным нулю, и будут справедливы следующие соотношения:

$$\left. \begin{aligned} I_x p_1 - I_{C_0} p_2 - I_{R_0} p_3 &= I_y p_v; \\ I_x &= \frac{\dot{U}_n n_1}{n_n Z_x} = \frac{\dot{U}_n n_1}{n_n} \left(\frac{1}{R_x} + j \omega C_x \right); \\ I_{C_0} &= \frac{\dot{U}_n (n_2 + n_3) m_2}{n_n m_1} j \omega C_0; \\ I_{R_0} &= \frac{\dot{U}_n (n_2 + n_3) m_2}{n_n m_1} \frac{1}{R_0}, \end{aligned} \right\} (1)$$

* Целесообразность применения усилителей с малым входным сопротивлением показана Е. А. Будницкой и А. И. Новиком.

где I_x , I_{C_0} , I_{R_0} , I_y — токи в контролируемом конденсаторе, образцовом конденсаторе, образцовом сопротивлении и в указательной обмотке компаратора токов; \dot{U}_n — напряжение питания моста. Из (1) нетрудно найти

$$\dot{I}_y = \frac{\dot{U}_n}{n_n p_y} \left[\frac{n_1 p_1}{R_x} + j \omega C_x n_1 p_1 - \frac{(n_2 + n_3) m_2}{m_1} \left(j \omega C_0 p_2 + \frac{p_3}{R_0} \right) \right].$$

При этом составляющая тока I_y , синфазная (противофазная) напряжению питания моста \dot{U}_n , определится из выражения

$$\operatorname{Re} \left(\frac{\dot{I}_y}{\dot{U}_n} \right) = \frac{1}{n_n p_y} \left[\frac{n_1 p_1}{R_x} - \frac{(n_2 + n_3) m_2 p_3}{m_1 R_0} \right], \quad (2)$$

а составляющая тока I_y , находящаяся в квадратуре с напряжением питания моста, равна

$$\operatorname{Im} \left(\frac{\dot{I}_y}{\dot{U}_n} \right) = \frac{\omega}{n_n p_y} \left[n_1 p_1 C_x - (n_2 + n_3) p_2 \frac{m_2}{m_1} C_0 \right]. \quad (3)$$

При условии $\operatorname{Im} \left(\frac{\dot{I}_y}{\dot{U}_n} \right) = 0$ имеем

$$C_x = \frac{n_2 + n_3}{n_1} \frac{p_2}{p_1} \frac{m_2}{m_1} C_0. \quad (4)$$

Полагая в (4) $C_x = C_{xH} + \Delta C_x$ и $m_2 = m_{20} + \Delta m_2$, получим

$$1 + \frac{\Delta C_x}{C_{xH}} = \frac{C_0}{C_{xH}} \frac{(n_2 + n_3) p_2 m_{20}}{n_1 p_1 m_1} \left(1 + \frac{\Delta m_2}{m_{20}} \right), \quad (5)$$

где C_{xH} — номинальное значение контролируемой емкости; ΔC_x — абсолютное (положительное или отрицательное) отклонение этой емкости от номинала; m_{20} — число витков, соответствующее равновесию моста при C_{xH} ; Δm_2 — отклонение от этого числа в соответствии с величиной ΔC_x .

Величина $\frac{\Delta C_x}{C_{xH}}$ представляет собой относительное (процентное) отклонение контролируемой емкости от номинального значения. Как видно из (5), чтобы по числу витков m_2 можно было отсчитать $\frac{\Delta C_x}{C_{xH}}$ для любых C_{xH} , т. е. чтобы $1 + \frac{\Delta C_x}{C_{xH}} = 1 + \frac{\Delta m_2}{m_{20}}$ или $\frac{\Delta C_x}{C_{xH}} = \frac{\Delta m_2}{m_{20}}$, необходимо выполнить условие

$$\frac{C_0}{C_{xH}} \frac{n_2 + n_3}{n_1} \frac{p_2}{p_1} \frac{m_{20}}{m_1} = 1. \quad (6)$$

Это означает, что при выбранном постоянном значении C_0 для установки различных номинальных значений контролируемых емкостей можно использовать величины $n_2 + n_3$ и $\frac{p_2 m_{20}}{n_1 p_1 m_1}$. Первую из них целесообразно использовать для установки номинала на данном пределе, а вторую для установки предела измерения.

При выполнении условия (6) из (3) имеем

$$\operatorname{Im} \left(\frac{\dot{I}_y}{\dot{U}_n} \right) = \omega \frac{n_2 + n_3}{n_n} \frac{m_{20}}{m_1} \frac{p_2}{p_y} C_0 \left(\frac{\Delta C_x}{C_{xH}} - \frac{\Delta m_2}{m_{20}} \right). \quad (7)$$

Следовательно, для определения процентных отклонений емкостей по значениям $\frac{\Delta m_2}{m_{20}}$ (или m_2) можно использовать знак составляющей I_y , квадратурной к напряжению питания моста \dot{U}_n . Далее, заменив в (2) величины

$$\frac{1}{R_x} = \omega C_x \operatorname{tg} \delta_x \text{ и } \frac{1}{R_0} = \omega C_0 \frac{p_2}{p_3} \operatorname{tg} \delta_0, \quad (8)$$

получим

$$\operatorname{Re} \left(\frac{I_y}{\dot{U}_n} \right) = \frac{\omega n_1 p_1 C_x}{n_n p_y} \left[\operatorname{tg} \delta_x - \frac{(n_2 + n_3) m_2 p_2 C_0}{n_1 m_1 p_1 C_x} \operatorname{tg} \delta_0 \right]. \quad (9)$$

Из анализа (8) и (9) вытекает, что при использовании величины p_3 в качестве переменной можно устанавливать значения $\operatorname{tg} \delta_0 = \frac{1}{\omega C_0 R_0 p_2} p_3$, соответствующие заданным допустимым значениям $\operatorname{tg} \delta_{x \text{ доп}}$. При этом соотношение («больше», «меньше» или «равно») между $\operatorname{tg} \delta_x$ и установленным значением $\operatorname{tg} \delta_0$ можно определить по знаку или величине $\operatorname{Re} \left(\frac{I_y}{\dot{U}_n} \right)$.

Величина $\frac{(n_2 + n_3) m_2 p_2 C_0}{n_1 m_1 p_1 C_x}$ в (9), равная при условии (6) $1 + \frac{\Delta m_2}{m_{20}}$, характеризует равновесие или неравновесие мостовой измерительной цепи по емкости в момент контроля $\operatorname{tg} \delta_x$.

Погрешность задания допустимого значения $\operatorname{tg} \delta_{x \text{ доп}}$ определится из следующего выражения:

$$\Delta \operatorname{tg} \delta_{x \text{ доп}} = \frac{\frac{\Delta m_2}{m_{20}} - \frac{\Delta C_x}{C_{xH}}}{1 + \frac{\Delta C_x}{C_{xH}}} \operatorname{tg} \delta_0. \quad (10)$$

Задавшись величиной $\Delta \operatorname{tg} \delta_{x \text{ доп}}$ при заданных допустимых значениях $\operatorname{tg} \delta_0$, нетрудно, используя (10), найти величину допустимого неравновесия мостовой измерительной цепи по емкости $\left(\frac{\Delta m_2}{m_{20}} - \frac{\Delta C_x}{C_{xH}} \right)$, при которой будет обеспечен контроль $\operatorname{tg} \delta_x$ с требуемой точностью.

Как показали исследования, рассмотренная измерительная цепь обеспечивает высокую точность измерения (контроля) обоих параметров конденсаторов. На ее основе в ИАЭ СО АН СССР создан автоматический процентный мост (с квадратурными фазочувствительными детекторами) для контроля конденсаторов по классам точности с емкостями от 10 пф до 1,1 мкф; диапазон устанавливаемых номинальных значений тангенса угла потерь от $5 \cdot 10^{-3}$ до $5 \cdot 10^{-2}$. Погрешность контроля емкости не более 0,2%, а тангенса угла потерь — не более $(0,05 \operatorname{tg} \delta + 4 \cdot 10^{-4})$. Заметим, что пределы контроля с помощью такой цепи без особых затруднений можно расширить в обе стороны, а погрешность контроля снизить по емкости, например, до 0,1% и менее.

Могут быть получены и другие модификации измерительных цепей с тремя парами плеч отношения, если в рассмотренной схеме поменять

местами источник питания и указатель равновесия или изменить функции плечевых элементов.

При перемене местами источника синусоидального напряжения и указателя вместо цепи с двумя трансформаторами напряжения и компаратором токов получим цепь с одним трансформатором напряжения, трансформатором тока и компаратором токов.

Изменение функций различных плечевых элементов по сравнению с функциями, которые они выполняют в схеме рис. 1, может привести к улучшению некоторых метрологических характеристик цепи. Так, в измерительной цепи, представленной на рис. 2*, для отсчета процентных

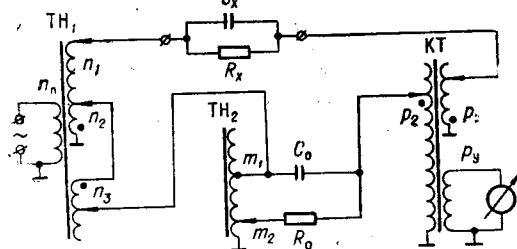


Рис. 2.

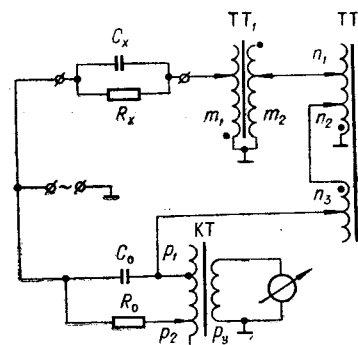


Рис. 3.

отклонений емкости используется число витков p_2 обмотки компаратора токов, а номинал тангенса угла потерь устанавливается витками m_2 обмотки трансформатора напряжения $ТН_2$. В этом случае справедливы соотношения:

$$1 + \frac{\Delta C_x}{C_{xн}} = \frac{C_0}{C_{xн}} \frac{n_2 + n_3}{n_1} \frac{p_2}{p_1}; \quad \text{tg } \delta_0 = \frac{1}{\omega C_0 R_0} \frac{m_2}{m_1}.$$

Благодаря тому, что образцовый конденсатор C_0 подключен непосредственно к обмоткам первого трансформатора напряжения $ТН_1$, фазовая погрешность второго трансформатора $ТН_2$ в меньшей степени влияет на точность контроля тангенса угла потерь.

Не останавливаясь на всех возможных модификациях измерительных цепей с тремя парами плеч отношения, укажем еще на два варианта включения плечевых элементов, которые, на наш взгляд, заслуживают особого внимания. При одном из них все плечи отношения включаются только в цепи напряжений и в качестве плечевых элементов используются три трансформатора напряжения, а при втором — плечи включаются только в цепи токов и используются два трансформатора тока и один компаратор токов.

Схема измерительной цепи, построенной по последнему варианту, приведена на рис. 3. Для этой цепи имеют место соотношения:

$$1 + \frac{\Delta C_x}{C_{xн}} = \frac{C_0}{C_{xн}} \frac{n_2 + n_3}{n_1} \frac{m_2}{m_1}; \quad \text{tg } \delta_0 = \frac{1}{\omega C_0 R_0} \frac{p_2}{p_1}.$$

Характерной особенностью последней цепи является то, что на всех пределах измерения напряжение на контролируемом конденсаторе со-

* Эта схема предложена Ф. Б. Гриневичем и А. В. Чеботаревым для измерения емкости и тангенса угла потерь конденсаторов.

храняется постоянным. Кроме того, для всех номиналов остается практически постоянной абсолютная чувствительность по току при уравнивании по емкости, в то время как в двух предыдущих схемах эта чувствительность внутри каждого предела изменяется в десять раз.

Рассмотрим далее некоторые вопросы автоматического уравнивания приведенных измерительных цепей.

Важным требованием, предъявляемым к процентным мостам, в особенности к мостам, предназначенным для производственного контроля конденсаторов, является (наряду с требованиями надлежащей точности, высокого быстродействия и удобства в эксплуатации) их относительная простота.

Степень сложности автоматических цифровых мостов переменного тока зависит, в частности, от способа, которым производится уравнивание измерительной цепи моста. В мостах в настоящее время используются все известные способы уравнивания цифровых измерительных приборов — развертывающее, следящее и поразрядное (метод взвешивания). При уравнивании многодекадного моста по двум параметрам, в особенности при наличии двусторонней связи контуров уравнивания, обычно используются следящий и поразрядный способы [4, 5]. Применение в таких случаях развертывающего уравнивания затруднительно и нерационально, так как приводит к заметному снижению быстродействия моста.

Однако способ развертывающего уравнивания имеет важное преимущество: он проще по сравнению с двумя остальными способами. Благодаря своей относительной простоте, этот способ широко применяется в технике автоматического контроля и измерений, и в тех случаях, когда контуры уравнивания развязаны или между ними имеется односторонняя связь, а также когда уравнивание осуществляется по одному параметру, этот способ с успехом может быть использован в мостах переменного тока. В исследуемых схемах процентных мостов уравнивание производится только по емкости; число шагов (тактов) в процессе уравнивания невелико, и применение развертывающего способа оказывается выгодным, так как позволяет создать простые и быстродействующие мосты. Ниже описывается предложенный авторами способ подекадно-развертывающего* отдельного уравнивания цифровых мостов переменного тока с индуктивно связанными плечами. Этот способ позволяет строить исключительно простые устройства автоматического уравнивания, содержащие практически только самые необходимые элементы — уравнивающие счетчики.

Особенностью подекадно-развертывающего уравнивания вообще является то, что на каждой из декад производится одностороннее движение в сторону равновесия с помощью неревверсивных уравнивающих элементов. Так, в автоматическом цифровом мосте [6] подход к состоянию равновесия на каждой декаде осуществляется сверху, т. е. от состояния «много». После того как мост в процессе уравнивания данной декадой оказывается в состоянии «мало», полностью вводится следующая младшая декада (при этом мост переходит в состояние «много») и снова осуществляется движение к состоянию равновесия сверху регулировкой этой новой декады.

Однако возврат к одному и тому же исходному состоянию перед уравниванием каждой новой декадой вызывает многократные пе-

* Подекадно-развертывающим, по аналогии с подекадно-следящим, можно назвать уравнивание, начинаемое со старшей декады с последовательным переходом на младшие.

реключения состояний указателя равновесия. Указатель меняет состояние дважды: первый раз после перехода точки равновесия на предыдущей декаде и вторично после полного введения следующей младшей декады. Автоматизация уравнивания по такому способу связана с дополнительными усложнениями, обусловленными двойной переменной состояния указателя.

Процесс подекадно-развертывающего уравнивания может быть упрощен, если к состоянию равновесия на соседних декадах подходить с разных сторон. После перехода состояния равновесия моста регулированием одной декады сразу же, при новом состоянии указателя, начинают движение к равновесию с другой стороны шагами следующей младшей декады. При этом каждая декада изменяется только в одном направлении.

Поскольку сам принцип развертывающего уравнивания исключает возможность реверсирования уравнивающих устройств (что, кстати, является одним из достоинств этого способа, так как не могут возникнуть автоколебания), то изменять направление уравнивания по соседним декадам можно только с помощью измерительной цепи. Это легко сделать в цепях с индуктивно связанными элементами: достаточно плечевые обмотки, соответствующие соседним декадам, включить встречно.

На рис. 4, а показана схема автоматического процентного моста, измерительная цепь которого (см. рис. 1) уравнивается по емкости данным способом. Мост предназначен для контроля конденсаторов по

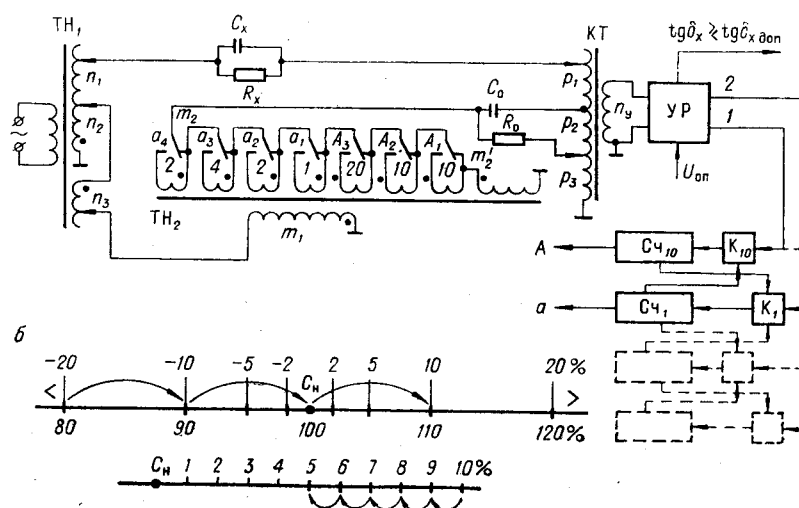


Рис. 4.

классам точности в соответствии с различными отклонениями их емкости от номинала в пределах $\pm 20\% C_n$ (например, $\pm 2\% C_n$, $\pm 5\% C_n$, $\pm 10\% C_n$ и $\pm 20\% C_n$).

Уравнивание осуществляется двумя счетчиками СЧ₁₀ и СЧ₁, которые работают от импульсов, поступающих на них через ключи К₁₀, К₁ с указателя равновесия УР.

Счетчик десятков СЧ₁₀, управляющий контактами А₁₋₃, производит уравнивание ступенями в $10\% C_n$ в пределах от $80\% C_n$ до

120% C_n . Дискретные значения параметра через 10% формируются тремя секциями обмотки трансформатора ТН₂ с числами витков, пропорциональными весам 10, 10, 20. Эти секции включаются согласно с той частью обмотки, которая состоит из витков m_2^1 и соответствует значению емкости 80% C_n . Как видно из рисунка, витки m_2^1 включены в исходном положении, поэтому на старшей декаде подход к равновесию производится снизу.

Счетчик Сч₁, управляя контактами a_{1-4} , уравнивает цепь ступенями в 1% C_n после того, как пройдено состояние равновесия на старшей декаде. Секции тетрады, коммутируемые контактами a_{1-4} , имеют числа витков, пропорциональные весам 1, 2, 4, 2, и включены встречно с предыдущими обмотками. По мере ввода этих секций происходит движение к равновесию в обратном направлении, т. е. сверху. На рис. 4, б показана диаграмма уравнивания моста для случая, когда емкость контролируемого конденсатора находится внутри интервала (105 ÷ 106) % C_n .

Указатель равновесия УР, включающий в себя и необходимые усилительные элементы, определяет знак неравновесия измерительной цепи по обоим параметрам. Он может быть построен, например, на основе квадратурных фазочувствительных детекторов. В зависимости от знака неравновесия моста по емкости на одном из его выходов, 1 или 2, следуют импульсы, причем на выходе 1 они должны быть в состоянии моста «мало», а на выходе 2 — в состоянии «много».

Нетрудно видеть, насколько просты функциональные связи счетчиков между собой и с указателем. Ключи K_{10} , K_1 управляются следующим образом: счетчик старшей декады, выйдя из своего нулевого положения, открывает ключ на входе счетчика следующей младшей декады, а последний, как только уходит из нулевого состояния, закрывает входной ключ счетчика предыдущей старшей декады (пунктиром, для примера, дополнена схема связей при четырех разрядах).

В соответствии с данной схемой построен разработанный в ИАЭ СО АН СССР автоматический мост, характеристики которого приведены выше.

ВЫВОДЫ

Процентные мосты с высокими метрологическими и эксплуатационными характеристиками, предназначенные для контроля емкости и тангенса угла потерь конденсаторов, целесообразно строить на основе цепей с тесной индуктивной связью, которые должны иметь не менее трех пар плеч отношения. Метрологические характеристики таких цепей изменяются в зависимости от функций различных плечевых элементов.

Для обеспечения отдельного уравнивания по емкости и исключения влияния параметров компаратора токов на точность измерения входное сопротивление усилителя сигнала неравновесия моста следует выбирать столь возможно малым.

Автоматическое уравнивание процентных мостов по емкости выгодно производить таким подекадно-развертывающим способом, при котором подход к состоянию равновесия на соседних декадах происходит с разных сторон. Этот же способ, позволяющий обойтись исключительно простыми устройствами уравнивания, можно использовать и при отдельном уравнивании по двум параметрам.

ЛИТЕРАТУРА

4. В. Ю. Кнеллер, Автоматические мосты переменного тока, Новосибирск, РИО СО АН СССР, 1964.
5. В. Ю. Кнеллер, Автоматическое измерение составляющих комплексного сопротивления, М—Л, «Энергия», 1967.
6. А. Н. Комов, Автоматический цифровой мост переменного тока.— Автоматический контроль и методы электрических измерений (труды III конференции). Новосибирск, РИО СО АН СССР, 1964.

*Поступила в редакцию
23 февраля 1968 г.*