

Ф. Б. ГРИНЕВИЧ, А. В. ЧЕБОТАРЕВ

(Новосибирск)

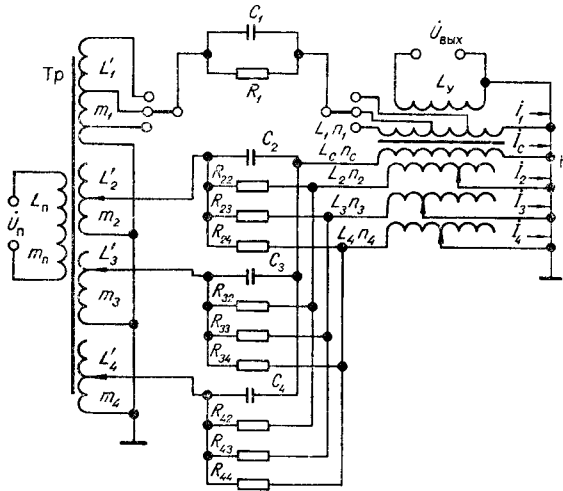
ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ЦЕПЬ ЦИФРОВОГО АВТОМАТИЧЕСКОГО МОСТА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Рассмотрена принципиальная схема измерительной цепи разработанного авторами цифрового экстремального моста переменного тока, предназначенного для измерения емкости и тангенса угла потерь конденсатора. Проанализированы условия равновесия измерительной цепи и практические возможности ее реализации.

Цифровые автоматические мосты переменного тока находят в настоящее время все более широкое применение. Важным узлом цифрового моста, в значительной степени определяющим точность прибора в целом, является его измерительная цепь. Хорошие результаты получаются при использовании в цифровых мостах переменного тока измерительных цепей с тесной индуктивной связью между плечами [1]. Уравновешивание этих цепей наиболее целесообразно производить путем изменения количества витков индуктивных плеч, так как при этом паразитные проводимости коммутирующих элементов шунтируют лишь индуктивные плечи мостовой цепи, что не вызывает значительных погрешностей измерения [2]. Такая мостовая цепь, обеспечивающая отдельный отсчет величин емкости и проводимости потерь, описана в [3]. Однако в большинстве случаев наиболее удобной характеристикой качества конденсаторов является не проводимость, а тангенс угла потерь, поскольку вычисление тангенса угла потерь по известным величинам проводимости потерь, емкости конденсатора и частоте напряжения питания является нежелательной дополнительной операцией. Поэтому в мостах переменного тока, предназначенных для измерения параметров конденсаторов, обычно требуется отдельный отсчет величин емкости и тангенса угла потерь. В измерительных цепях с индуктивно связанными плечами отдельный отсчет емкости и тангенса угла потерь может быть получен, если при уравновешивании по емкости изменять количество витков одного из индуктивных плеч, а при уравновешивании по тангенсу угла потерь — образцовое сопротивление. Однако в такой схеме проводимости коммутирующих элементов, шунтирующих образцовое сопротивление, могут вызвать существенную погрешность измерения.

В описанном ранее цифровом экстремальном мосте переменного тока [4], предназначенном для измерения емкости и тангенса угла потерь конденсаторов, используется разработанная авторами измеритель-

ная цепь с индуктивно связанными плечами, в которой уравнивание по обоим параметрам производится путем изменения одних только количеств витков индуктивных плеч при обеспечении раздельного отсчета величин емкости и тангенса угла потерь [5]. Принципиальная схема измерительной цепи представлена на рисунке. Контролируемый конденсатор с эквивалентными параметрами C_1 и R_1 включается в первую ветвь мостовой цепи



последовательно с индуктивным плечом L_1 . Напряжение на эту ветвь мостовой цепи подается с m_1 витков обмотки L_1' прецизионного трансформатора напряжения Тр. Образцовые конденсаторы C_2, C_3 и C_4 соединяются вместе и подключаются к обмотке L_C компаратора токов К. Другие выводы образцовых конденсаторов подключаются соответственно к m_2, m_3 и m_4 виткам обмоток L_2, L_3 и L_4 трансформатора Тр. Вместе с образцовыми конденсаторами к обмоткам

L_2, L_3 и L_4 подключаются образцовые сопротивления $R_{22}, R_{23}, R_{24}, R_{32}, R_{33}, R_{34}$ и R_{42}, R_{43}, R_{44} . Вторые выводы этих сопротивлений соединяются по три вместе R_{22} с R_{32} и R_{42} , R_{23} с R_{33} и R_{43} , R_{24} с R_{34} и R_{44} и подключаются соответственно к обмоткам L_2, L_3 и L_4 компаратора тока. Обмотки L_C, L_2, L_3 и L_4 включаются таким образом, что создаваемые ими магнитные потоки суммируются между собой и вычитаются из магнитного потока катушки L_1' . Кроме этих обмоток, компаратор К имеет указательную обмотку L_Y . Обмотки L_1', L_2', L_3' и L_4' трансформатора Тр наматываются в одну сторону, концы обмоток соединяются с землей, поэтому напряжения на обмотках синфазны. Напряжение питания мостовой цепи U_n подается на обмотку L_n , которая состоит из m_n витков.

Для доказательства возможности получения раздельного отсчета величин C_1 и $\operatorname{tg} \delta_1$ произведем расчет измерительной цепи в общем виде для моста с $(p-1)$ -декадным отсчетом по емкости и $(q-1)$ -декадным отсчетом по тангенсу угла потерь. Обозначим токи в обмотках $L_1, L_C, L_2, L_3, L_4, \dots, L_q$ соответственно $i_1, i_C, i_2, i_3, i_4, \dots, i_q$. Мостовая цепь уравновешена, если

$$i_1 n_1 - \left(i_C n_C + \sum_{l=2}^q i_l n_l \right) = 0. \quad (1)$$

Токи в обмотках L_1 и L_C компаратора К можно определить как

$$i_1 = \frac{U_n}{m_n} m_1 \left(\frac{1}{R_1} + j \omega C_1 \right);$$

$$i_C = \frac{i_{II}}{m_{II}} \sum_{k=2}^p j_{\omega} C_k m_k.$$

Ток любой из остальных обмоток компаратора тока можно выразить в следующем общем виде:

$$I_l = \frac{U_{II}}{m_{II}} \sum_{k=2}^p \frac{m_k}{R_{kl}},$$

где l — любое целое число в пределах от 2 до q .

Подставив значения токов в уравнение (1), после преобразования получим условие равновесия измерительной цепи в виде двух равенств:

$$C_1 = \frac{n_C}{m_I n_I} \sum_{k=2}^p m_k C_k; \quad (2)$$

$$R_1 = \frac{m_I n_I}{\sum_{l=2}^q \sum_{k=2}^p \frac{n_l m_k}{R_{kl}}}. \quad (3)$$

Предположим, что

$$\frac{C_k}{C_2} = \frac{R_{k2}}{R_{k2}} = a_k \text{ и } \frac{R_{kl}}{R_{kl}} = b_l,$$

где k и l — соответственно любые целые числа от 2 до p и q .

Тогда выражения (2) и (3) можно записать в виде:

$$C_1 = \frac{n_C C_2}{m_I n_I} \sum_{k=2}^p a_k m_k; \quad (4)$$

$$R_1 = \frac{m_I n_I R_{22}}{\sum_{l=2}^q b_l n_l \sum_{k=2}^p a_k m_k}. \quad (5)$$

Тангенс угла потерь контролируемого конденсатора при параллельной схеме замещения можно определить как

$$\operatorname{tg} \delta_1 = \frac{1}{\omega R_1 C_1}.$$

Подставляя в последнее выражение равенства (4) и (5), получим

$$\operatorname{tg} \delta_1 = \frac{1}{n_C \omega R_{22} C_2} \sum_{l=2}^q b_l n_l. \quad (6)$$

Если уравновешивание по емкости производить путем изменения чисел витков m_2, m_3, \dots, m_p , а уравновешивание по тангенсу угла по-

терь — путем изменения n_2, n_3, \dots, n_q , то, как видно из (4) и (6), в рассматриваемой измерительной цепи получается раздельный отсчет измеряемых величин.

Выбор величин коэффициентов a и b и соотношений между максимальными количествами витков обмоток, уравнивающих по каждому параметру, зависит от применяемой системы счисления. При этом всегда должны выполняться равенства:

$$m'_k a_k = m'_2 A^{-(k-2)}; \quad n'_l b_l = n'_2 A^{-(l-2)},$$

где m_2, m'_k, n_2, n'_l — максимальные количества витков в уравнивающих обмотках;

k и l — любые числа от 2 до p и q соответственно;

A — основание системы счисления.

Рассмотрим некоторые варианты выполнения уравнивающих обмоток измерительной цепи. Если эти обмотки можно сделать одинаковыми, то величины образцовых конденсаторов и сопротивлений должны отличаться друг от друга в соответствии с коэффициентами применяемой системы счисления (1, 2, 4, 8, 16 и т. д. — при двоичной системе счисления или 1, 2, 4, 2, 10, 20, 40, 20 и т. д. — при двоично-десятичной). При этом каждая уравнивающая обмотка будет представлять собой одну секцию, переключаемую одним коммутирующим элементом (на переброс). Коммутирующие элементы могут быть бесконтактными, так как все они будут иметь общую точку.

Однако при использовании двоично-десятичной системы счисления возможно и другое решение. Образцовые конденсаторы и сопротивления можно сделать отличающимися друг от друга в десять раз ($a_3 = b_3 = 0,1$; $a_4 = b_4 = 0,01$ и т. д.). При этом некоторые сопротивления получаются равными, например $R_{23} = R_{32}$, $R_{24} = R_{33} = R_{42}$. Тогда уравнивающие обмотки будут представлять собой идентичные параллельные индуктивные тетрады [4]. Числа витков в секциях каждой тетрады должны отличаться в зависимости от коэффициентов выбранного двоично-десятичного кода (например, 1, 2, 4, 2). Необходимо отметить, что некоторые образцовые сопротивления, подключаемые к последним тетрадам уравнивания по емкости, иногда оказываются излишними. Дело в том, что влияние этих сопротивлений на величину тангенса угла потерь может оказаться меньше минимального шага уравнивания по $\operatorname{tg} \delta$.

На основе рассмотренной измерительной цепи был создан опытный образец цифрового моста класса 0,1 с четырехдекадным уравниванием по емкости и трехдекадным — по тангенсу угла потерь [4]. Измерительная цепь рассчитана на измерение параметров конденсаторов емкостью от 10 $n\phi$ до 10 $mk\phi$ с тангенсом угла потерь от $2 \cdot 10^{-4}$ до 0,1. Рабочая частота моста 1 $кГц$. В качестве коммутирующих элементов применяются обычные реле. В качестве образцовых элементов используются воздушные конденсаторы класса 0,03 и сопротивление типа БЛП.

Трансформатор напряжения выполнен на ферритовом сердечнике с магнитной проницаемостью 1000, сечением 3 $см^2$ и наружным диаметром 100 $мм$. На сердечник (равномерно по всей длине) нанесена генераторная обмотка, на которую наложен экран из тонкой фольги. Поверх экрана несколькими жгутами намотаны плечевые обмотки. Компаратор тока конструктивно выполнен аналогично трансформатору напряжения.

Цифровой автоматический мост успешно прошел испытания и принят для серийного производства.

ЛИТЕРАТУРА

1. К. Б. Карандеев. Специальные методы электрических измерений. М.—Л., Госэнергоиздат, 1963.
2. А. Л. Грохольский. К вопросу о погрешности моста с индуктивно связанными плечами при шунтировании их сопротивлениями.— Электрические методы автоматического контроля (Труды ИАЭ СО АН СССР), вып. 5. Новосибирск, Изд-во СО АН СССР, 1962.
3. K. Flether. Use of Transformer Ratio Arm Bridges in Component Measurements.— Radio and Electron. Compon., 1962, v. 3, № 2, pp. 117—123.
4. Ф. Б. Гриневич, А. В. Чеботарев, А. И. Новик. Элементы и схемы цифровых экстремальных мостов переменного тока. Фрунзе, Изд-во АН КиргССР, 1963.
5. Ф. Б. Гриневич, А. В. Чеботарев. Мост с индуктивно связанными плечами для измерения параметров конденсаторов. Авторское свидетельство № 169676. Бюллетень изобретений, 1965, № 7.

*Поступила в редакцию
1 ноября 1965 г.*
