

Автоматический широкодиапазонный трансформаторный мост для измерения емкости и тангенса угла потерь

М. Н. СУРДУ*, А. Л. ЛАМЕКО*, Л. Н. СЕМЕНЬЧЕВА**, Э. А. АБРОСИМОВ***, А. А. МАМОНОВ***

* Укрметртестстандарт, Киев, Украина, e-mail: michaelsturdu1941@gmail.com

** Институт электродинамики НАН Украины, Киев, Украина

*** Сибирский научно-исследовательский институт метрологии, Новосибирск, Россия, e-mail: abrosimov@sniim.sibiria.net

Описан высокоточный трансформаторный мост для измерения емкости и тангенса угла потерь в широких динамическом и частотном диапазонах. В основу построения моста положен принцип вариационной калибровки, который позволяет исключить влияние источников погрешности на результат измерения. Основная погрешность измерения емкости не превышает 10^{-6} .

Ключевые слова: измерение, неопределенность, трансформаторный мост, коррекция, емкость, тангенс угла потерь.

The precision transformer bridge for measurement of the capacity and dissipation factor in wide dynamic and frequency ranges is described. The bridge construction is based on the variational calibration principle allowing to exclude the influence of error sources on the result of measurement. The intrinsic measurement error does not exceed 10^{-6} .

Key words: measurement, uncertainty, transformer bridge, correction, capacity, dissipation factor.

Трансформаторные измерительные мосты являются самыми точными приборами для измерения параметров импеданса на звуковых и высоких частотах [1—8]. Эти мосты уравниваются изменением отношения числа витков плечевых обмоток трансформатора. Высокая точность отношения плеч моста, малое число необходимых образцовых мер, высокая защищенность от влияния паразитных проводимостей и коммутационных помех, возможность получения прямых линий уравнивания — все это делает трансформаторные мосты переменного тока с тесной индуктивной связью основой для создания прецизионных цифровых измерителей импеданса.

Трансформаторные мосты переменного тока обычно строятся по схемам сравнения напряжений или токов. Первый вид мостов используется для измерения малых импедансов, а второй — для измерения малых проводимостей. Это связано с тем, что мосты со сравнением токов хорошо защищены от влияния паразитных проводимостей на результат измерения и плохо защищены от влияния импеданса проводов и обмоток, а мосты со сравнением напряжений, наоборот, хорошо защищены от влияния соединительных проводов на результат измерения импеданса и плохо защищены от влияния паразитных проводимостей.

В широком динамическом диапазоне измеряемых величин тот и другой виды мостов обладают неисключенной погрешностью измерения. Известно множество работ, посвященных снижению погрешности измерения широкодиапазонных трансформаторных мостов переменного тока, однако существующие методы решения этой проблемы приводят к усложнению прибора и сужению его частотного диапазона.

Другой недостаток трансформаторных мостов связан с необходимостью использования многодекадного делителя для их точного уравнивания. Если, например, требуется

обеспечить погрешность уравнивания не более 10^{-7} , то трансформаторный делитель должен быть восьмидекадным. Такой делитель обычно содержит 4—7 трансформаторов и до сотни коммутаторов. Следует также учесть, что для уравнивания моста по двум параметрам приходится использовать два делителя и высокоточный 90° -фазовращатель. В результате изначально простой трансформаторный мост превращается в сложное измерительное устройство.

Ниже рассмотрен трансформаторный мост переменного тока, в котором для достижения высокой точности измерений в широком диапазоне значений импеданса и для упрощения схемы используется вариационный метод коррекции погрешностей измерения [9, 10]. Основная идея метода заключается в вариации коэффициента влияния источника погрешности на результат измерения и выполнении дополнительных измерений. Решение системы уравнений, которая описывает процессы измерения при помощи моста до и после введения вариации, позволяет исключить влияние соответствующего источника погрешности на результат измерения.

Структурная схема измерительной цепи вариационного трансформаторного моста в режиме сравнения токов приведена на рис. 1. Мост содержит трансформатор напряжения, на его первичную обмотку m_0 подается напряжение от перестраиваемого генератора переменного тока. Напряжение с вторичной регулируемой декадной обмотки m_1 поступает на образцовую меру Z_0 , а напряжение с вторичной обмотки m_2 — на исследуемую меру Z_x . Токи, протекающие через образцовую меру и объект измерения, вычитаются на индикаторе токов ИТ, роль которого выполняет векторный вольтметр, измеряющий составляющие сигнала неравновесия в произвольном ортогональном базисе. Разностный сигнал неравновесия сводится к нулю регулировкой числа витков обмотки m_1 .

В исходном состоянии мост уравнивается при подключении индикатора токов ИТ к потенциальному зажиму объекта измерения. С учетом импедансов подводящих проводов Z_1 , Z_2 , Z_n уравнение равновесия моста имеет вид

$$\frac{(Z_x + Z_2)}{Z_0 + Z_1 + Z_n} = \frac{m_2}{m_1} = \frac{Z_x}{Z_0} \left(1 + \frac{Z_2}{Z_x}\right) / \left(1 + \frac{Z_1}{Z_0} + \frac{Z_n}{Z_0}\right). \quad (1)$$

Погрешность измерения моста определяется погрешностью образцовой меры Z_0 , погрешностью трансформаторного делителя напряжения T , дискретностью уравнивания моста и ненулевыми значениями импедансов соединительных проводов и обмоток трансформаторного делителя (отношения Z_2/Z_x , Z_1/Z_0 , Z_n/Z_0). Погрешность образцовой меры устраняется автоматической калибровкой моста по внешней мере; погрешность трансформаторного делителя конструктивными мерами можно уменьшить до 10^{-7} и менее. Влияние последних четырех источников погрешности исключается вариационным методом.

Исключение влияния погрешности уравнивания. Пусть точка истинного равновесия моста определяется величинами m_p или Z_p , а относительные расстояния от точки равновесия до текущего состояния моста — величинами δm или δZ . Выполним аддитивную вариацию погрешности уравнивания, изменив число витков обмотки m_1 на Δm_v . Два следующих уравнения описывают сигнал неравновесия до и после вариации:

$$\begin{aligned} \frac{U_r}{m_0} \frac{m_2}{Z_x + Z_2} - \frac{U_r}{m_0} \frac{m_1}{Z_1 + Z_n + Z_0} &= I_1; \\ \frac{U_r}{m_0} \frac{m_2}{Z_x + Z_2} - \frac{U_r}{m_0} \frac{m_1 + \Delta m_v}{Z_1 + Z_n + Z_0} &= I_{1v}. \end{aligned} \quad (2)$$

Решение этой системы имеет вид

$$\frac{Z_0}{Z_x} \frac{1 + (Z_1 + Z_n)/Z_0}{1 + Z_2/Z_x} - \frac{m_1}{m_2} = -\frac{I_1}{\Delta I_v} \delta m_v = -A_1, \quad (3)$$

где $\delta m_v = \Delta m_v/m_2$; $\Delta I_v = I_{1v} - I_1$.

Пусть $(Z_1 + Z_n)/Z_0$ и $Z_2/Z_x \ll 1$, как это обычно бывает.

Тогда $\delta Z = -\delta m = Z_0/Z_x - m_1/m_2 \approx -A_1$. (4)

Расчеты по (4) используют на двух этапах. На первом этапе по описанной выше процедуре определяется величина δm и проводится быстрое уравнивание моста путем ее занесения в трансформаторный делитель. При этом погрешность уравнивания определяется погрешностью $\delta_{дт}$ от дискретности трансформаторного делителя. На втором этапе, после окончания процесса уравнивания и повторения описанной выше вариационной процедуры, найденная комплексная величина δZ используется для уточнения результата измерения, полученного в процессе уравнивания.

Как следует из (3), погрешность определения неравновесия моста зависит только от дискретности и нелинейности функции преобразования векторного вольтметра. Обозначим эту величину $\delta_{дв}$. Эквивалентная погрешность дискретности δ_d моста, очевидно, выражается $\delta_d = \delta_{дт} \delta_{дв}$. Существующая элементная база позволяет легко реализовать простой векторный вольтметр с нелинейностью функции преобразования менее 10^{-4} и порогом чувствительности менее 10^{-5} . При использовании такого вольтметра для достижения эквивалентной погрешности от дискретности менее 10^{-8} достаточно применить индуктивный делитель с тремя—четырьмя разрядами. Таким образом, применение varia-

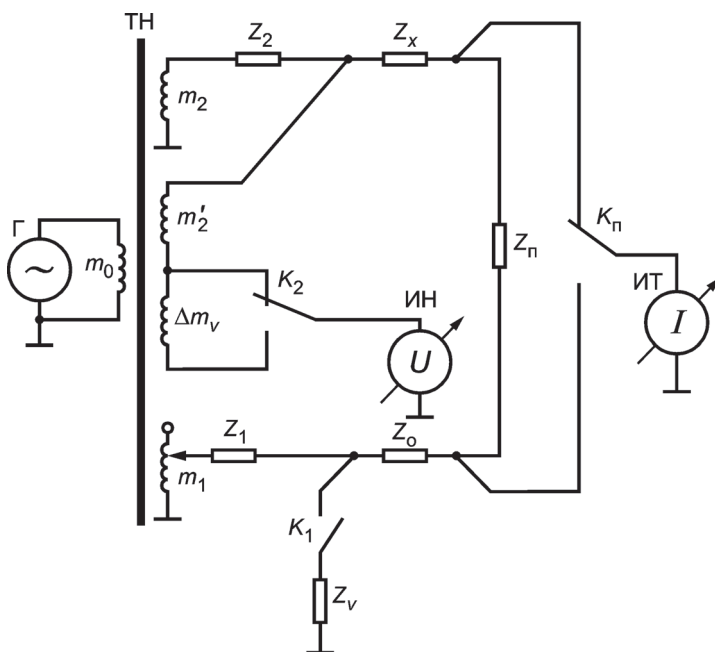


Рис. 1. Измерительная цепь трансформаторного моста в режиме сравнения токов

ционного метода позволило снизить число разрядов делителя более чем в два раза и существенно упростить прибор.

Исключение погрешности, обусловленной импедансом кабеля, соединяющего Z_x и Z_0 . Для этого переключают индикатор ИТ при помощи коммутатора K_n , как показано на рис. 1, и тем самым переключают импеданс Z_n кабеля из одной ветви моста в другую. Проводят измерения двух соответствующих сигналов неравновесия I_1 и I_2 . Тогда выходные сигналы моста описываются системой уравнений

$$\begin{aligned} \frac{U_r}{m_0} \frac{m_2}{Z_x + Z_2} - \frac{U_r}{m_0} \frac{m_1}{Z_1 + Z_n + Z_0} &= I_1; \\ \frac{U_r}{m_0} \frac{m_2}{Z_x + Z_2 + Z_n} - \frac{U_r}{m_0} \frac{m_1}{Z_1 + Z_0} &= I_2, \end{aligned}$$

решение которых имеет вид

$$Z_n \approx A_2 Z_0 / (1 + Z_0/Z_x); \quad A_2 = \Delta I_{21} \Delta m_v / (\Delta I_v m_1),$$

где $I_{21} = I_2 - I_1$.

Исключение погрешности измерения, вызванной нагрузкой индуктивного делителя m_1 . При этом изменяют нагрузку обмотки m_1 при помощи дополнительной образцовой меры Z_v (см. рис. 1) и коммутатора K_1 . Сигналы неравновесия до и после вариации описываются уравнениями

$$\begin{aligned} \frac{U_r}{m_0} \frac{m_2}{Z_x + Z_2} - \frac{U_r}{m_0} \frac{m_1}{Z_1 + Z_n + Z_0} &= I_1; \\ \frac{U_r}{m_0} \frac{m_2}{Z_x + Z_2} - \frac{U_r}{m_0} \frac{m_1}{Z_1 + Z_n + Z_0 + Z_0 Z_1/Z_v} &= I_3. \end{aligned}$$

Их приближенное решение имеет вид

$$Z_1 \approx Z_v A_3, \quad (5)$$

где $A_3 = \Delta I_{31} \Delta m_v / (\Delta I_v m_1)$; $\Delta I_{31} = I_3 - I_1$.

Исключение погрешности, обусловленной нагрузкой обмотки m_2 . Для этого трансформатор снабжают дополнительной обмоткой m_2' , один конец которой подсоединяют к потенциальному зажиму объекта измерения Z_x , а другой — к

вариационной обмотке Δm_v (см. рис. 1). Индикатор напряжения (векторный вольтметр) поочередно подключается к концам обмотки коммутатором K_2 . Этот процесс описывают уравнения

$$U_r m_2 Z_2 / (m_0 Z_x) = U_1; U_r m_2 Z_2 / (m_0 Z_x) + U_r \Delta m_v / m_0 = U_2,$$

решение которых $Z_2 = A_4 Z_0$, где $A_4 = U_1 \Delta m_v / (\Delta U_v m_1)$; $\Delta U_v = U_2 - U_1$.

Подставляя Z_1 , Z_2 , Z_n в (1) легко найдем искомое отношение сравниваемых импедансов Z_x / Z_0 .

На практике первоначально выполняются необходимые вариации и мост уравнивается. Затем проводятся вариации, направленные на подавление погрешностей измерительной цепи и осуществляются требуемые измерения сигналов. Далее формируется единая система уравнений, решение которой дает точные значения параметров Z_1 , Z_2 , Z_n и отношения импедансов Z_x / Z_0 .

При измерении низкоомных импедансов измерительную цепь трансформаторного моста переводят в режим сравнения напряжений, а детектор равновесия — в режим индикатора напряжения (рис. 2). Измерительная цепь в этом случае построена с использованием того же трансформатора напряжения TH . Регулируемая декадная обмотка m_1 совместно с образцовой мерой Z_0 образует генератор тока, который протекает через объект измерения Z_x и вызывает на нем падение напряжения U_x . Индикатор напряжения $ИН1$ выделяет сигнал неравновесия ΔU , который сводится к нулю регулировкой числа витков обмотки m_1 . Уравнение равновесия моста имеет вид

$$\frac{Z_x / Z_0}{1 + (Z_1 + Z_n + Z_2) / Z_0} = \frac{m_1}{m_2}. \quad (6)$$

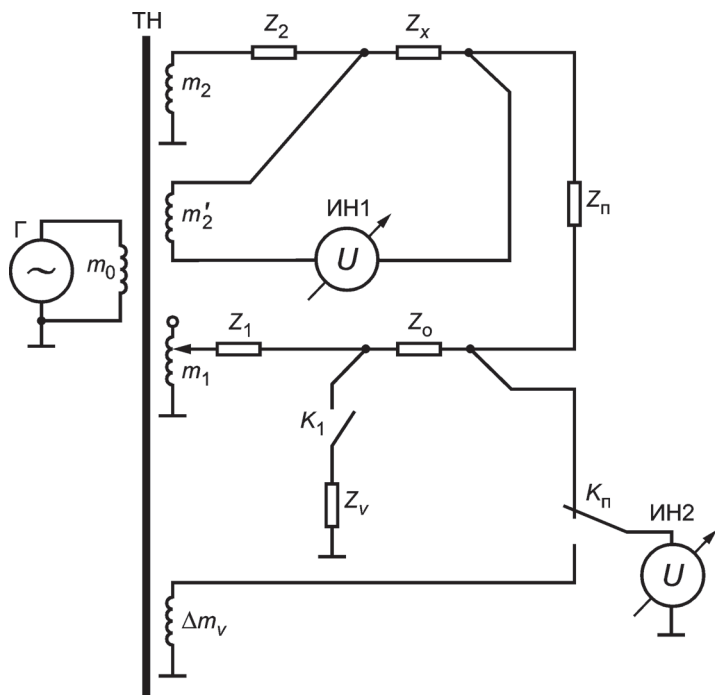


Рис. 2. Измерительная цепь трансформаторного моста в режиме сравнения напряжений

Как следует из (6), импеданс подводящих проводов влияет лишь на погрешность формирования образцового тока.

Для измерения импеданса в мосте со сравнением напряжений первоначально уравнивают мост при ограниченном числе декад делителя напряжения, после чего определяют неравновесие моста и уточняют результат уравнивания. При этом используют ранее описанный алгоритм вариационного уравнивания моста в режиме сравнения токов и соответствующие уравнения (2)–(4), заменив в них неравновесные токи на соответствующие неравновесные напряжения.

Погрешность формирования образцового тока складывается из двух составляющих: $(Z_n + Z_2) / Z_0$ и Z_1 / Z_0 . Для их устранения выполняют два дополнительных вариационных измерения. Чтобы определить погрешность $(Z_n + Z_2) / Z_0$ при помощи индикатора напряжения $ИН2$ и коммутатора K_n , измеряют напряжение U_1 (падение напряжения на суммарном импедансе $Z_1 + Z_2$) и вариационное напряжение U_2 , на обмотке Δm_v . Результаты этих измерений описываются уравнениями

$$\frac{U_r m_1}{m_0} \frac{(Z_n + Z_2) / Z_0}{1 + (Z_n + Z_2 + Z_1) / Z_0} = U_1; \frac{U_r}{m_0} \Delta m_v = U_2,$$

откуда $(Z_n + Z_2) / Z_0 \approx A_5$, где $A_5 = U_1 \Delta m_v / (U_2 m_1)$.

Составляющая погрешности Z_1 / Z_0 определяется при использовании вариации нагрузки и вычисляется по (5). Подставляя значения полученных погрешностей в (6), находим точное значение результата измерения.

На основе изложенных выше принципов был построен автоматический широкополосный широкодиапазонный трансформаторный мост «Сибирячка» для измерения емкости и тангенса угла потерь в диапазоне частот 45 Гц — 100 кГц. Мост автоматически измеряет параметры импеданса при его четырехпарном подключении. В таблице приведены емкости образцового конденсатора C_0 , диапазоны измерения емкости C_x , составляющие основной погрешности измерения δ_i и порог чувствительности δ_n моста на частоте 1 кГц. Здесь $\delta_i = \delta_0 + \delta_n$; δ_0 — погрешность внутренней образцовой меры (на интервале 1 нед после калибровки по внешней мере $\delta_0 < 10^{-6}$ при условии непрерывной работы моста, годовая нестабильность не превышает $3 \cdot 10^{-5}$); $\delta_n = \delta_1 (1 + \beta C_0 / C_x)$ — нелинейность функции преобразования; значения δ_1 и β приведены в таблице.

Характеристики трансформаторного моста «Сибирячка»

C_0	C_x	$\delta_1 \cdot 10^6$	β	δ_n
100 пФ	0—100 пФ	1	0,3	$10^{-7} C_x + 10^{-19}$
100 пФ	0,1—1,0 нФ	1	0,3	$10^{-7} C_x + 10^{-18}$
100 пФ	1—10 нФ	1	0,3	$10^{-7} C_x + 10^{-17}$
100 нФ	10—100 нФ	3	0,3	$10^{-6} C_x + 10^{-14}$
100 нФ	0,1—1,0 мкФ	10	1,0	$10^{-5} C_x + 10^{-13}$
100 нФ	1,0—10 мкФ	30	3,0	$10^{-5} C_x + 10^{-11}$

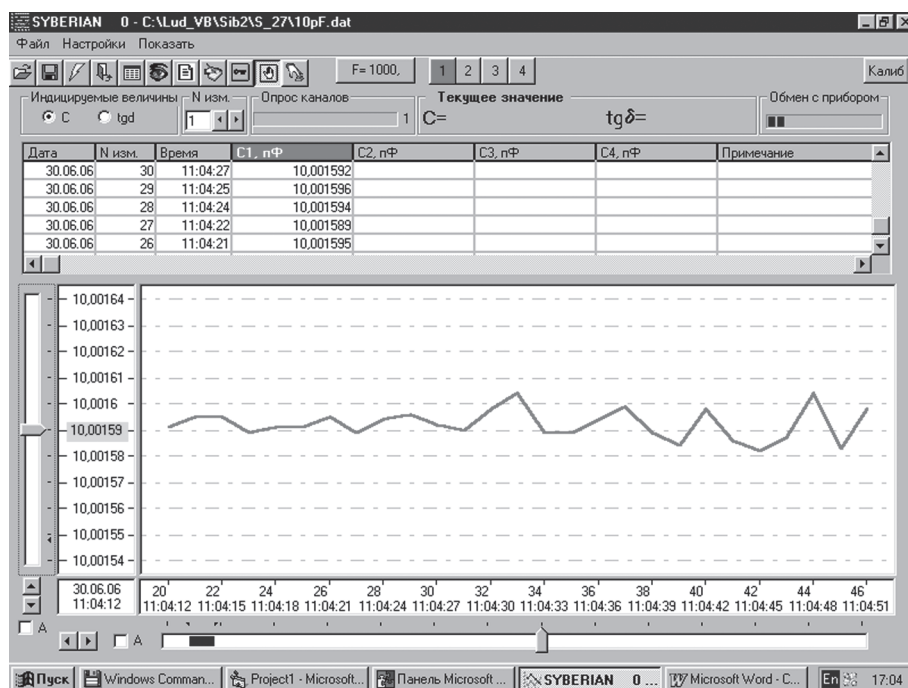


Рис. 3. Главное меню программы

Диапазон измеряемых значений тангенса угла потерь 0—0,01; разрешающая способность по тангенсу угла потерь не менее $1 \cdot 10^{-6}$; масса прибора 5 кг.

Конструктивно внутренние образцовые меры моста помещены в термостат. Температуры нагревателя термостата и мер выводятся на табло прибора. В процессе наладки трансформаторного моста определены температурные коэффициенты мер, которые в дальнейшем учитываются в цифровой форме при изменении их температуры. Нестабильность температуры в термостате составляет около 0,003 °C при изменении температуры окружающей среды 1 °C.

Управление работой моста осуществляется компьютером путем передачи команд и приема данных измерения по последовательному каналу связи RS-232. Результаты измерения представляются в графической и табличной формах на экране компьютера в его главном меню (рис. 3).

Проведенные теоретические исследования и их экспериментальная проверка показали, что вариационная коррекция погрешности измерений является эффективным

средством повышения точности измерений в широкодиапазонных трансформаторных мостах. Благодаря такому подходу широкодиапазонный автоматический трансформаторный мост «Сибирячка» отличается высокой точностью измерения, малыми габаритными размерами и массой.

Литература

1. **Pat. 323,037 GB.** Alternating Bridge circuits / A. D. Blumlein // The Illustrated Official J. Patents. 12 Feb. 1930. P. 7727—7728.
2. **Brooks H. D., Holtz F. C.** The Two-Stage Current Transformer // Am. IEE Trans. 1922. V. XLI. P. 382—393.
3. **Thompson A. M.** The precise measurement of small capacitances // IRE Trans. Instrum. 1958. V. 1—7. P. 3—4.
4. **Thompson A. M.** AC bridge methods for the measurement of three terminal admittances // IEEE Trans. Instrum. and Measur. 1964. V. IM-13. N 4. P. 189—197.
5. **Jeffery A. M.** New Multi-frequency Bridge at NIST // BNM-LCIE. 1998. P. G1-G37.

6. **Гриневич Ф. Б. и др.** Трансформаторные измерительные мосты. М.: Энергия, 1970.
7. **Абросимов Э. А., Мамонов А. А.** Прецизионные мостовые измерители на основе схем с индуктивно-связанными плечами // Труды метролог. ин-тов СССР. М., 1970. Вып. 103 (163). С. 47—57.
8. **Kibble B. P., Rayner G. H.** Coaxial AC bridges. Bristol: Adam Hilger Ltd., 1984.
9. **Гриневич Ф. Б., Сурду М. Н.** Высокоточные вариационные измерительные системы переменного тока. Киев: Наукова думка, 1989.
10. **Сурду М. Н. и др.** Измерительно-вычислительная система для прецизионного определения параметров RCL-мер // Метрологическое обеспечение и стандартизация: Материалы X Всеакад. междунар. школа по проблемам метрологического обеспечения и стандартизации. Минск, 1992. С. 109—111.

Дата принятия 03.05.2013 г.