

А. Л. ГРОХОЛЬСКИЙ, Э. Л. КАЩЕЕВ
(Новосибирск)

О ПОСТРОЕНИИ ПРЕЦИЗИОННОГО ТРАНСФОРМАТОРНОГО МОСТА*

Описывается прецизионный трансформаторный мост для измерения емкостей в диапазоне от 0,01 до 10000 $n\phi$ с погрешностью до 0,001%. В качестве образцового переменного конденсатора применен оригинальный конденсатор с перекрестной емкостью. Производится анализ возможных погрешностей. Описывается конструкция переменного конденсатора и схема моста. Прибор предназначен в основном для аттестации образцовых мер емкости.

Современная радиотехника предъявляет весьма жесткие требования к элементам радиотехнических устройств. Измерение параметров некоторых типов конденсаторов производится с точностью, приближающейся к уровню современных метрологических возможностей. Поэтому перед измерительной техникой постоянно стоит задача повышения точности, а главное, обеспечения единства измерений. Совсем недавно мосты, измеряющие емкость с погрешностью 0,1%, считались точными. В результате успехов технологии и схемных решений в последние годы появились приборы с рекламируемым классом 0,01%. Ведущие метрологические учреждения страны выпускают единичные экземпляры мостов-компараторов, имеющих погрешность 0,001—0,05%. Эти приборы работают в комплекте с образцовыми мерами высокого разряда и могут применяться только в Институтах Комитета стандартов, не решая, таким образом, проблемы единства измерений. Мосты, выпускаемые в настоящее время промышленностью и отраслевыми научно-исследовательскими институтами, по последним данным [1], имеют класс не выше 0,1%, что сейчас уже недостаточно.

Перед измерительной техникой стоит задача создать несложный, удобный в эксплуатации высокоточный измерительный прибор, который может применяться на различных ступенях метрологической службы, вплоть до заводской лаборатории.

Класс современных измерительных мостов переменного тока, особенно мостов с тесной индуктивной связью, определяется в основном точностью и стабильностью встроенных образцовых мер. В настоящее время для перекрытия широкого диапазона измеряемых емкостей, как

* Материал доложен на VII Всесоюзной конференции по автоматическому контролю и методам электрических измерений в сентябре 1965 г. в Новосибирске.

правило, применяются магазины постоянных и переменных емкостей различных номиналов от долей пикофарады до 0,1 мкф. Даже лучшие из них, состоящие из слюдяных и воздушных конденсаторов специальной конструкции, можно аттестовать не точнее чем в 0,01—0,03%. Кроме того, такие конденсаторы имеют ТКЕ, существенно сказывающийся при высоких точностях, и подвержены старению (их стабильность порядка 0,01% в год). Таким образом, значительное повышение точности мостов, использующих магазины емкости, вряд ли возможно.

Развитие теории и практики мостов с тесной индуктивной связью открывает широкие возможности при конструировании точных измерительных приборов.

Как известно [2], трансформаторные плечевые элементы с тесной электромагнитной связью позволяют получить плечевые отношения в весьма широких пределах с очень большой точностью. Отношение плеч устойчиво при действии паразитных проводимостей и обладает температурной и временной стабильностью. Эти свойства мостов с индуктивно связанными плечами отношений позволяют перекрыть диапазон измеряемых емкостей с помощью одной или нескольких образцовых мер высокого класса. В 1957 году Д. Г. Лампардом [3] была доказана возможность создания такой конструкции цилиндрического конденсатора, у которого емкость на единицу длины постоянна, не зависит от размеров поперечных сечений электродов и равна

$$\frac{\ln 2}{4\pi^2}.$$

На основании этого принципа как за границей [4, 5], так и у нас [6] были созданы эталонные конденсаторы очень высокой точности. Новый тип конденсатора получил название — конденсатор с перекрестной емкостью (КПЕ). Все описанные эталонные конденсаторы имеют значительные размеры, не выдерживают никакой тряски, работают в вакууме, поэтому применять их можно только в стационарных условиях.

С целью использования принципа действия КПЕ в переносной измерительной аппаратуре авторами был разработан переносный образцовый конденсатор с расчетной емкостью [7]. Этот принцип уже достаточно известен, поэтому остановимся на нем весьма кратко. Если имеется цилиндрическая поверхность произвольного поперечного сечения, разделенная зазорами на четыре части (рис. 1, а), то при выполнении условия равенства «перекрестных» емкостей $C_{12} = C_{34}$ емкость на единицу длины между двумя противоположными электродами, например между 1 и 2, при двух других заземленных не зависит от формы поперечного сечения, постоянна и равна, как уже указывалось,

$C_0 = \frac{\ln 2}{4\pi^2} = 0,017557623$ эл. ст. ед/см, или 0,019535485 пф/см при скорости света, равной 299792,50 км/сек. Равенство перекрестных емкостей легче всего получить с помощью четырех цилиндрических электродов, расположенных симметрично (см. рис. 1, б). В [3] показано, что отклонение отношения геометрических размеров от единицы на величину δ влечет за собой ошибку в определении C_0 второго порядка мало-

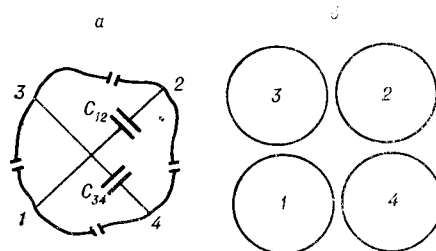


Рис. 1.

сти (δ^2). Наличие между электродами зазоров величиной в одну десятую диаметра электрода вызывает погрешность в расчетной емкости, меньшую $2 \cdot 10^{-7}$ [4]. На основе изложенных положений сконструирован переносный образцовый конденсатор с расчетной емкостью. Конденсатор состоит из трех групп электродов (рис. 2), имеющих форму кругового цилиндра. К первой группе относится единственный низко-

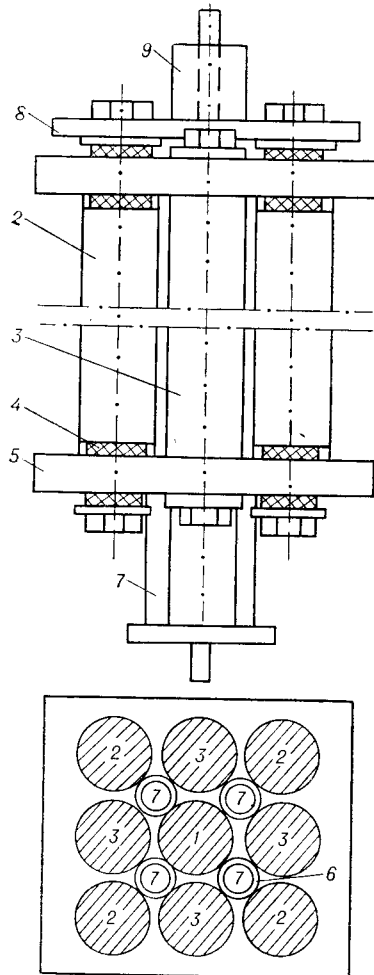


Рис. 2.

индуктивность системы уменьшается приблизительно в шестнадцать раз. Электрод 1 окружен со всех сторон электродами 2 и 3, экранирующими его от действия внешних электрических полей, поэтому вся система мало чувствительна к электромагнитным помехам. Параллельное включение электродов позволяет при перемещении экранирующих стержней на 100 мм получить изменение емкости переменного конденсатора $\Delta C = 0,7814194$ нф. Для измерения такого перемещения удобно применить серийно выпускаемый прибор — горизонтальный оптический длиномер КИЗ-2. Он имеет стеклянную шкалу длиной 100 мм с ценой деления 1 мк. Шкала аттестуется с погрешностью 0,3 мк, что при длине

потенциальный электрод 1, установленный в центре. Вторую группу составляют четыре высокопотенциальных электрода 2, третью — четыре экранирующих электрода 3. Все геометрические размеры конструкции выдержаны с точностью $\pm 0,01$ мм. Электроды 2 и 1 укреплены с помощью фарфоровых изоляторов 4 на платах 5, а экранирующие электроды — на тех же платах без изоляторов. Экранирующие электроды и платы образуют жесткую систему. В отверстия 6 платы 5 входят экранирующие стержни 7, имеющие электрический контакт с платой 5 посредством пружинящих втулок. Глубина погружения стержней 7 в пространство между электродами 1, 2 измеряется оптической системой. Все электроды 2 соединены токопроводящим диском 8, переходящим в наружную оболочку коаксиального соединительного устройства 9. Помимо механической прочности, такая конструкция обладает еще рядом преимуществ. Симметричное расположение электродов 2 и 3 относительно электрода 1 уменьшает индуктивность ввода конденсатора, а с ней и частотную зависимость емкости. Частотная зависимость емкости уменьшается также за счет шунтирующего действия стержней 7, так как длина электродов описываемого конденсатора в четыре раза меньше длины электродов одиночного конденсатора с той же емкостью. Кроме того, все электроды включены параллельно. За счет укорочения электродов и их параллельного включения

100 мм составляет $3 \cdot 10^{-6}$. Стекло марки Ф-8, из которого изготовлена шкала, имеет коэффициент линейного расширения $\alpha = 1,01 \cdot 10^{-5}$. Таким образом, если температура в помещении известна с точностью $\pm 1^\circ \text{C}$, перемещение экранирующих стержней переменного конденсатора может быть определено с погрешностью $1,31 \cdot 10^{-5}$.

Значение емкости C_0 негерметизированного конденсатора зависит также от изменения диэлектрической постоянной воздуха, которое можно рассчитать по формуле Вольперта [8]. Расчеты показывают, что при отклонении температуры помещения на $\pm 2^\circ \text{C}$, влажности воздуха на $\pm 20\%$ и атмосферного давления на ± 20 мм от стандартных значений (20°C , 60% , 760 мм) величина диэлектрической проницаемости изменится на $\pm 2 \cdot 10^{-5}$. При введении поправок, учитывающих давление, температуру и влажность воздуха, значение диэлектрической проницаемости можно рассчитать с погрешностью, несколько меньшей $1 \cdot 10^{-5}$. Игак, анализ погрешностей КПЕ приводит к следующим результатам:

погрешности за счет наличия зазоров $2 \cdot 10^{-7}$, неточности геометрических размеров $1 \cdot 10^{-6}$, недостоверности знания скорости света $1 \cdot 10^{-6}$, неточности определения длины $1,3 \cdot 10^{-5}$, изменения диэлектрической проницаемости $1 \cdot 10^{-5}$.

Как видно, основным источником погрешности является изменение длины шкалы под действием температуры. Если измерить температуру воздуха с точностью $\pm 0,2^\circ$, что составит ошибку в определении длины $\pm 2 \cdot 10^{-6}$, то с помощью КПЕ можно воспроизвести единицу емкости с погрешностью $1-3 \cdot 10^{-5}$ при введении поправок на температуру, давление и влажность, а также градуировку шкалы. Без введения этих поправок возможная погрешность не превысит $5-7 \cdot 10^{-5}$.

Получить большую точность переменного конденсатора любой конструкции с воздушным диэлектриком и микронным отсчетом вряд ли возможно.

Для того, чтобы реализовать высокую точность расчетного образцового конденсатора в широком диапазоне измеряемых емкостей, необходимы индуктивные делители, позволяющие получить отношение плеча моста с точностью, по крайней мере, не меньшей, чем у образцового конденсатора. Для этой цели могут быть использованы разработанные одним из авторов трансформаторы [9, 10], позволяющие получить плечевые отношения $1 : 100$ с погрешностью не более $1 \cdot 10^{-5}$, а $1 : 10$ и $1 : 1$ с погрешностью соответственно $1 \cdot 10^{-7}$ и $1 \cdot 10^{-9}$. Используя схему моста с двойным отношением плеч, можно перекрыть диапазон от 0,0001 до 10 000 величины образцовой емкости. Мы ограничились нижним пределом в 0,01 C_0 с тем, чтобы оставить число витков в одном из плеч моста неизменным для включения вспомогательной ветви, о которой будет сказано ниже.

Рассмотрим схему моста (рис. 3). Мост имеет два трансформатора Tr_1 и Tr_2 . Трансформатор Tr_1 , включаемый в цепь генератора, состоит из 13 секций по 4 жилы в каждой. Секции соединены таким образом, что образуют четыре обмотки — компенсационную, генераторную и две плечевые I и II . От секций 12 и 13 в обмотке I сделаны отводы для пересчетного устройства. Обмотка II имеет отводы от 0,01 и 0,1 числа витков в десяти секциях. Еще три секции включены для симметрии обмоток I и II . Обмотки I и II включены согласно.

Трансформатор Tr_2 , включаемый в цепь индикатора, состоит из 10 секций по 4 жилы в каждой. Секции образуют четыре обмотки — компенсационную, индикаторную и две плечевые III и IV . Обе плечевые обмотки имеют отводы от 0,01 и 0,1 числа витков. Плечевые обмотки включены встречно. Отводы от плечевых обмоток подходят к контактам

переключателей Π_1, Π_2, Π_3 . К переключателям Π_3 и Π_2 подключаются образцовый конденсатор C_3 и клеммы C_x . Нетрудно показать, что если число витков обмотки I равно n , а каждый из переключателей Π_1, Π_2 и Π_3 находится в положении, при котором числа витков обмоток II, III и IV соответственно равны m, p и q , то

$$C_x = C_3 \frac{nq}{mp}.$$

Назначение пересчетного устройства состоит в следующем. Известно, что в расчетном КПЕ при перемещении экрана на 100 мм емкость изменяется на 0,1953548 пф (в вакууме). В системе, состоящей из N

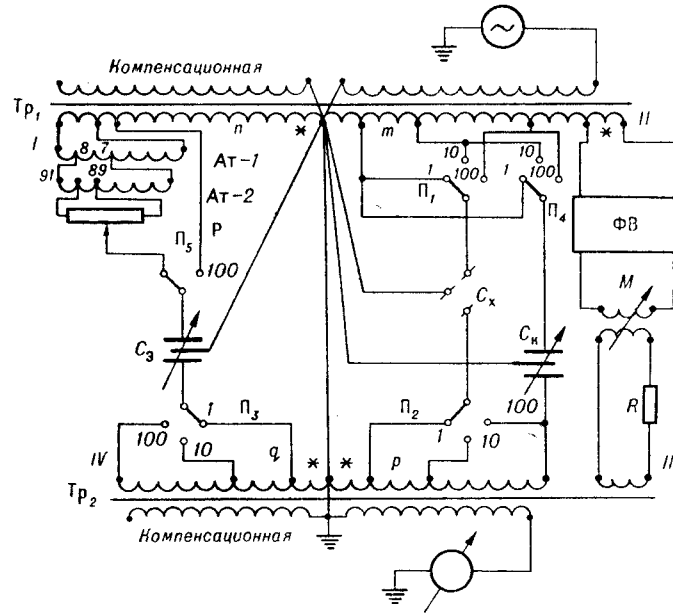


Рис. 3.

параллельных конденсаторов при диэлектрической проницаемости воздуха ϵ , емкость на единицу длины будет равна $0,1953548 N \epsilon$ пф.

Диэлектрическая проницаемость воздуха при определенном изменении условий (см. выше) может изменяться от 1,000535 до 1,000585. Так как перемещение экрана измеряется в единицах длины, то прямой отсчет емкости в пикофарадах при отношении $\frac{n}{m} = 1 \cdot 10^k$ невозможен.

Если же отношение $\frac{n}{m}$ сделать равным $\left(\frac{1}{0,1953548 N \epsilon}\right) \cdot 10^k$, что с учетом изменения ϵ и при $N=4$ составит $(1,279038 - 1,278974) \cdot 10^k$, то перемещение экрана на 100 мм будет эквивалентно изменению емкости на $1 \cdot 10^k$ пф. Это, во-первых, сделает возможным непосредственный отсчет и, во-вторых, изменит пределы моста от 0,01 до 10 000 пф.

Пересчетное устройство состоит из двух автотрансформаторов Ат-1 и Ат-2 и реохорда Р. Автотрансформатор Ат-1 имеет 10 секций с отводами от секций 7 и 8 и подключен к секциям 12 и 13 плечевой обмотки I . Автотрансформатор Ат-2 имеет 100 витков с отводами от 89 и 91-го витка и подключен к секциям 7 и 8 автотрансформатора Ат-1. К отводам от

89 и 91-го витка подключен реохорд Р. Перемещением движка реохорда можно изменить пересчетный множитель от 1,279100 до 1,278900. Движок связан со шкалой, по которой можно установить значение множителя в зависимости от температуры, давления и влажности воздуха. С помощью переключателя П₅ можно выключить пересчетное устройство.

Переменный конденсатор С_к служит для компенсации начальной емкости образцового переменного конденсатора. Так как действие начальной емкости меняется в зависимости от положения переключателя П₃, то конденсатор С_к включается в схему через переключатель П₄, что позволяет сохранять постоянное соотношение между начальной емкостью и емкостью конденсатора С_к на любом пределе. Переключатели П₁, П₂, П₃, П₄ совмещены на одной оси, и необходимые соотношения устанавливаются однозначно.

Цель компенсации активной составляющей должна вносить минимально возможную погрешность по емкости. Шунтирование обмотки трансформатора емкостью или введение каких-либо дополнительных элементов в плечи моста в приборе высокого класса неприемлемо. Наименьшие погрешности может дать метод, основанный на компенсации активной составляющей тока в индикаторном трансформаторе. Как известно, индикаторный трансформатор работает в токовом режиме и полное равновесие моста наступает в том случае, когда потоки, возбуждаемые в сердечнике токами, протекающими навстречу друг другу в обеих полуобмотках, компенсируются. При таком включении основные индуктивности обмоток не проявляются, и ток через обмотку определяется включенной в плечо емкостью, индуктивностью рассеяния и активным сопротивлением обмотки. Индуктивности рассеяния в мостовых трансформаторах весьма малы. Если емкостное сопротивление плеча больше активного сопротивления обмотки в $1 \cdot 10^6$ раз, что практически всегда выполняется, то с такой же точностью можно считать, что сдвиг фазы тока относительно напряжения вторичной обмотки генераторного трансформатора определяется комплексным сопротивлением конденсатора. При этом активная составляющая тока находится в фазе (или противофазе) с напряжением вторичной обмотки. Для компенсации активной составляющей тока можно применить, например, такой метод. Часть напряжения со вторичной обмотки генераторного трансформатора через вариометр М подается на дополнительную обмотку индикаторного трансформатора. Вариометр позволяет регулировать это напряжение в широких пределах по логарифмическому (витки удаляются или сближаются) и по синусоидальному (витки поворачиваются один относительно другого) законам. Первый способ употребляется для грубой регулировки, эквивалентной переключению пределов, второй — для плавной регулировки. В цепь включен фазовращатель ФВ, необходимый для точной подстройки фазы компенсирующего тока.

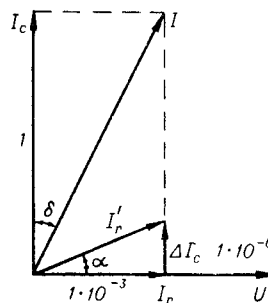


Рис. 4.

Для определения соотношения между элементами компенсирующей цепи зададимся максимальным значением $\text{tg } \delta$ измеряемого конденсатора $1 \cdot 10^{-3}$ и максимальной погрешностью за счет компенсирующей цепи $1 \cdot 10^{-6}$ (рис. 4).

Тогда $\text{tg } \alpha = \frac{\Delta I_c}{I_r} = 1 \cdot 10^{-3}$; в компенсирующей цепи $\text{tg } \alpha = \frac{U_L}{U_R} = \frac{\omega L}{R} = 1 \cdot 10^{-3}$. Это означает, что активное сопротивление цепи должно быть в $1 \cdot 10^3$ раз больше максимального индуктивного сопротивления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вторая Всесоюзная научно-техническая конференция по перспективным направлениям электроприборостроения. Обобщающий доклад. IV. Л., ОНТИ ВНИИЭП, 1965.
2. А. Л. Грохольский, К. М. Соболевский. Мосты переменного тока с индуктивно связанными плечевыми элементами.—Автометрия, 1965, № 1.
3. D. G. Lam p a r d. A new Theorem in Electrostatics with Applications to Calculable Standards of Capacitance.—Monograph N 216M IEE, January, 1957.
4. A. M. Thompson. The Presise Measurement of Small Capacitances.—IRE Trans. on Instrumentation, December, 1958.
5. W. K. Clothier. Etalon calculable de capacité du NSL.—10e Session. Com. Consult. electr., 1963. Paris, 1964.
6. А. Л. Грохольский, В. А. Одинцов. Эталонный конденсатор. Авторское свидетельство № 158346.—Бюллетень изобретений, 1963, № 21.
7. А. Л. Грохольский, Э. Л. Кашеев, Г. С. Федосеев. Эталонный конденсатор с расчетной емкостью. Авторское свидетельство № 171048.—Бюллетень изобретений, 1965, № 10.
8. Справочник по электротехническим материалам, т. I, ч. 1. Под ред. Ю. Б. Корницкого и Б. М. Тарсева. М.—Л., Госэнергоиздат, 1958.
9. А. Л. Грохольский. Трансформатор для включения в мостовую схему с индуктивно связанными плечами. Авторское свидетельство № 155854.—Бюллетень изобретений, 1963, № 14.
10. А. Л. Грохольский. Способ изготовления трансформаторов с распределенными параметрами. Авторское свидетельство № 164892.—Бюллетень изобретений, 1964, № 17.

*Поступила в редакцию
5 октября 1965 г.*
