

Метод создания высоковольтных мер – имитаторов малой ёмкости и тангенса угла потерь

М. Д. Клионский, К. И. Шипелев

Всероссийский НИИ метрологии им. Д.И. Менделеева

m.d.klionsky@vniim.ru, k.i.shipelev@vniim.ru

Аннотация. Проведён анализ существующих высоковольтных (ВВ) мер ёмкости и мер тангенса угла потерь, используемых для поверки и калибровки ВВ мостов и измерителей тангенса угла потерь. Установлено, что в диапазоне малых значений ёмкости (от 1 до 30 пФ) меры ёмкости и меры тангенса угла потерь (при малой ёмкости) отсутствуют. Между тем в методиках поверки ВВ мостов и измерителей указана необходимость поверки именно при малых значениях ёмкости и соответствующих значениях тангенса угла потерь. Разработан метод создания ВВ мер – имитаторов малой ёмкости и тангенса угла потерь, основанный на применении делителя напряжения и низковольтных мер ёмкости и тангенса угла потерь. Рассмотрена электрическая схема замещения разработанного устройства и получены расчётные соотношения. Приведены результаты экспериментальных исследований.

Ключевые слова: высоковольтные меры ёмкости и тангенса угла потерь; имитатор; делитель напряжения

I. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Высоковольтные (ВВ) меры электрической ёмкости, (далее – конденсаторы, ВВ конденсаторы), широко применяют в электроэнергетике при контроле параметров жидких и твердых диэлектриков (трансформаторного масла, изоляции вводов, кабелей, электродвигателей). Их используют в качестве эталонов в ВВ мостах переменного тока и измерителях тангенса угла потерь (далее – измерители, приборы). Эти конденсаторы применяют также для поверки и калибровки самих измерителей [1, 2]. ВВ мосты и измерители имеют нижний предел измерений ёмкости, начиная с 1 пФ, а диапазон D составляет от $1 \cdot 10^{-4}$ до 1. В прецизионных мостах нижняя граница D начинается с ещё меньшего значения – $1 \cdot 10^{-5}$. В настоящее время парк ВВ измерителей продолжает расширяться за счет приборов китайского производства. В разработанных в последние годы методиках поверки (МП) на ВВ мосты и измерители D (разработчик ФБУ «ВНИИМС», г. Москва, ныне ФБУ «НИЦ ПМ-Ростест»), заложена необходимость поверки этих приборов по C и D при $C = 4$ и 30 пФ и $D = 1 \cdot 10^{-4}$, $1 \cdot 10^{-3}$, $1 \cdot 10^{-2}$ и 0,1. Как показывает анализ, существующие ВВ меры ёмкости и меры тангенса угла потерь не охватывают область малых значений ёмкости (от 1 до 30 пФ), за исключением одной меры СА6221D-30-10, имеющейся в единственном экземпляре в ФБУ «НИЦ ПМ-Ростест», В упомянутых МП сокращённая поверка не предусмотрена, поэтому другие метрологические организации лишены возможности проводить поверку этих приборов. Таким образом, разработка и создание ВВ мер малой ёмкости и

соответствующих мер тангенса угла потерь (при малой ёмкости) является актуальной задачей.

II. МЕТОД СОЗДАНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ МЕР И РАСЧЁТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

В ВНИИМ разработан метод создания ВВ мер-имитаторов малой ёмкости и мер тангенса угла потерь (при малой ёмкости), предназначенных для поверки ВВ мостов и измерителей C и D при малых значениях ёмкости, в широком диапазоне значений D. Меры содержат ВВ ёмкостный делитель напряжения (ДН) с коэффициентом деления K и подключённые к его выходу низковольтные (НВ) меры ёмкости или меры тангенса угла потерь (рис. 1). Верхний предел диапазона напряжения разработанных мер-имитаторов определяется верхней границей рабочего напряжения используемого ДН. В разработанных устройствах применяется ранее неиспользованное свойство такой цепи уменьшать ёмкость НВ меры в K раз, а значение D передавать полностью.

Элементы схемы на рис. 1 удобно рассматривать как комплексные проводимости, характеризуемые ёмкостью и тангенсом угла потерь (формула 1). Коэффициент деления делителя напряжения (K) также является комплексной величиной, характеризуемой самим коэффициентом деления K и углом фазового сдвига φ . ДН обычно выполняют таким, чтобы угол φ был минимальным (не более 20 мин или $6 \cdot 10^{-3}$ рад, а для эталонных ДН – ещё меньше). Поэтому значение φ (в радианах) можно приравнять тангенсу фазового угла $\operatorname{tg} \varphi$, а учитывая ёмкостной характер плеч делителя, величину $\operatorname{tg} \varphi$ можно приравнять тангенсу угла потерь D_K .

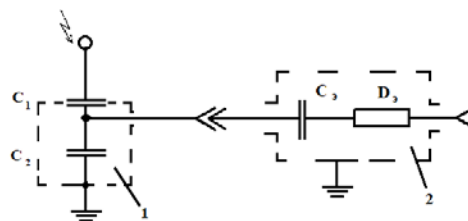


Рис. 1. Электрическая схема высоковольтной меры – имитатора малой ёмкости и тангенса угла потерь

1 – Ёмкостный делитель напряжения; 2 – НВ эталонная мера ёмкости; C_1 – ёмкость ВВ плеча ДН; C_2 – ёмкость НВ плеча ДН; C_3 и D_3 – ёмкость и тангенс угла потерь НВ эталонной меры ёмкости.

$$Y_1 = j\omega C_1 \cdot (1 - jD_1),$$

$$Y_2 = j\omega C_2 \cdot (1 - jD_2),$$

$$Y_3 = j\omega C_3 \cdot (1 - jD_3),$$

$$\dot{K} = K \cdot (1 + jD_K) \quad (1)$$

После преобразования звезды из трёх комплексных проводимостей Y_1, Y_2, Y_3 в треугольник получаем три комплексных проводимости Y_{12}, Y_{23} и Y_{13} (рис. 2).

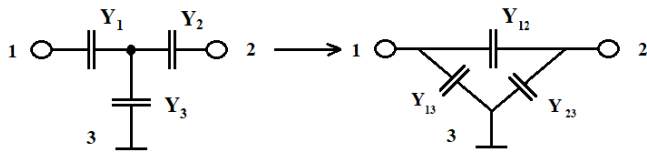


Рис. 2. Преобразование электрической схемы

Из них проводимость Y_{13} включена в измерительную цепь прибора и является объектом измерений. Две других проводимости не влияют на результат измерений: проводимость Y_{12} включена параллельно уравновешивающему устройству прибора (активному устройству измерителя или трансформаторному плечу ВВ моста). Её влияние может приводить к незначительному снижению чувствительности измерителя, а также к появлению дополнительной погрешности измерений по D (в случае использования ВВ моста эту погрешность при необходимости можно рассчитать). Проводимость Y_{23} включена параллельно источнику питания, имеющего очень малое входное сопротивление (обычно порядка долей ома), и потому эта нагрузка незначительна. По законам электротехники для проводимости Y_{13} получают:

$$Y_{12} = \frac{Y_1 \cdot Y_2}{Y_1 + Y_2 + Y_3} \quad (2)$$

где Y_{12} можно представить как $j\omega C_x \cdot (1 - jD_x)$.

Разделим числитель и знаменатель в (2) на Y_1 и учтём, что коэффициент деления делителя выражается формулой

$$\dot{K} = 1 + Y_3/Y_1.$$

Тогда

$$Y_{12} = \frac{Y_2}{\dot{K} + \frac{Y_2}{Y_1}} = \frac{Y_2}{\dot{K}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{Y_2}{\dot{K} \cdot Y_1}} \quad (3)$$

После подстановки выражений для Y_1, Y_3, \dot{K} из (1), разделения вещественных и мнимых составляющих и пренебрежения по сравнению с единицей членами, содержащими величины D^2 , получают:

$$C_x = \frac{C_3}{K} \cdot \frac{1}{1+p} \quad (4)$$

$$D_x = \frac{D_3 - D_K + pD_1}{1+p} \quad (5)$$

$$\text{где } p = \frac{C_3}{K \cdot C_1} \quad (6)$$

Величина p представляет собой относительный коэффициент, обычно находящийся в пределах от 0,001 до 0,01.

III. Числовая оценка входящих величин

Для ВВ ёмкостных делителей напряжения в диапазоне напряжения от 3 до 100 кВ коэффициент K обычно составляет от 33 до 1000 относительных единиц. Ёмкость C_1 высоковольтного плеча делителя составляет от 500 до 3300 пФ. При выборе НВ эталонной меры следует иметь в виду, что максимальное выходное напряжение делителя, которое прикладывается к мере,

обычно составляет 100 В. Поэтому здесь целесообразно использовать НВ меры ёмкости с воздушным диэлектриком Р597, у которых верхний предел рабочего напряжения составляет 200 В. Диапазон используемых значений мер Р597 от 0,4 до 4 нФ. Добавляя к этим мерам резисторы последовательно или параллельно, получают составные меры тангенса угла потерь (в соответствии с ГОСТ Р 8.686-2009). Следует учитывать, что собственный тангенс угла потерь воздушных мер Р597 в указанном диапазоне ёмкости весьма мал при частоте 1 кГц - порядка $(1-2) \cdot 10^{-5}$, но возрастает при частоте 50 Гц: до $1 \cdot 10^{-4}$ при ёмкости 1 нФ и до $3 \cdot 10^{-4}$ при ёмкости 4 нФ.

Можно также использовать меры с воздушным диэлектриком КВМ-2, КВМ-4 (выпускались ленинградским заводом «Эталон» мелкой серией). У этих мер, благодаря конструктивным особенностям, собственный D имеет такое же малое значение при 1 кГц, как у мер Р597, и не увеличивается при низких частотах.

Наряду с мерами с воздушным диэлектриком можно использовать ВВ меры ёмкости и тангенса угла потерь на основе твердых или пленочных диэлектриков, например, меру «Блок проверки «Тангенс-2000», предварительно откалибровав её при низком напряжении до 100 В частотой 50 Гц. При выборе НВ эталонной меры следует также учитывать необходимость обеспечения достаточного тока в измерительной цепи прибора.

Ток рассчитывают по формуле $I = U_3 \cdot \omega \cdot C_3$, где U_3 – напряжение на мере, подаваемое с выхода ДН, В; ω – круговая частота, равная $2\pi f$, f – частота, Гц. Например, у большинства измерителей, как отмечалось, нижний предел измерения ёмкости составляет 1 пФ, напряжение составляет 10 кВ частотой 50 Гц, тогда ток составляет 3 мкА, т.е. ток в измерительной цепи не должен быть меньше этого значения.

Оценим значение тока для упомянутого ниже имитатора на 4 пФ. В нём используется делитель ДН-50ЕО (до 50 кВ) и мера ёмкости 2 нФ. При подаваемом на делитель ДН-50ЕО напряжении 10 кВ на выходе получают $U_3 = 20$ В, тогда значение тока составляет 12 мкА, что обеспечивает нормальные условия работы прибора.

IV. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Была поставлена задача создать ВВ меру ёмкости номинальным значением $C_{ном} = 2$ пФ и ВВ меру тангенса угла потерь в диапазоне от $1 \cdot 10^{-4}$ до 0,1 при $C_{ном} = 4$ пФ. При выполнении работы использованы ёмкостный делитель напряжения ДН-50ЕО с допуском отклонением $\pm 1\%$, НВ воздушная мера ёмкости КВМ-2 ($C_{ном} = 1$ нФ) и две параллельно включённые ВВ меры тангенса угла потерь МПВ-5 (разработка ВНИИМ), каждая ёмкостью 1,01 нФ и D от $0,7 \cdot 10^{-4}$ до 0,1 [3]. Параметры делителя при напряжении 10, 20 и 50 кВ предварительно измерены методом компарирования токов с помощью ВВ ёмкостного автоматического моста СА7100М1 и ВВ источника питания [4]. Параметры НВ меры КВМ-2 при частоте 50 Гц измерены с помощью НВ моста АН7000. Погрешности измерений составляют 0,02 % по ёмкости и $0,1 \cdot 10^{-4}$ по D . Параллельно мере КВМ-2 подключён магазин ёмкости Р597/2 (0 – 40 пФ), что

позволяет получить целочисленное значение ёмкости на выходе имитатора. Для делителя ДН-50ЕО и НВ меры КВМ-2 получены следующие значения:

для ДН: $K = 501,8$, $\operatorname{tg} \varphi = -0,7 \cdot 10^{-4}$, $C_1 = 1000$ пФ, $D_1 = 68 \cdot 10^{-4}$; для КВМ-2: $C_s = 1007$ пФ, $D_s = 0,2 \cdot 10^{-4}$.

Меры МПВ-5 содержат керамические конденсаторы нулевой группы ТКЕ и работают при напряжении от 2 до 10 кВ. Исследование мер МПВ-5 при низком напряжении в диапазоне от 20 до 100 В частотой 50 Гц проводилось с помощью того же моста СА7100М1 (табл. 1). Для сравнения в табл. 2 приведены также значения этих параметров при напряжении 2 кВ. Максимальное расхождение составляет 0,1 % по С и $1 \cdot 10^{-4}$ по D. Из сравнения видно, что значения С и D, полученные при аттестации мер МПВ-5 при высоком напряжении, можно во многих случаях использовать и при низком напряжении.

Результаты измерений C_x и D_x на выходе имитатора представлены в табл. 2. Рядом в таблице приведены

расчётные значения этих величин, полученные по формулам (4) и (5).

ТАБЛИЦА 1. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ МЕР ТАНГЕНСА УГЛА ПОТЕРЬ МПВ-5 ПРИ НАПРЯЖЕНИИ 20 - 100 В И 2 КВ

Меры МПВ-5	Клеммы	20 - 100 В		2 кВ	
		С, пФ	D, 10^{-4}	С, пФ	D, 10^{-4}
№ 01	1	1010,9	0,7	1011,3	0,7
	2	1010,7	129,7	1011,2	130,3
	3	1001	1014	1001	1014
№ 02	1	1011,3	0,8	1011,7	0,6
	2	1011,1	130,7	1011,5	130,4
	3	1001	1015	1002	1015
№ 01 и № 02 параллельно	1	2022,1	0,8	2023,0	0,7
	1 + R _s *	2022,2	10,8	2022,8	10,7
	2	2021,9	130,5	2022,7	130,4
	3	2002	1015	2003	1014

*Последовательно с мерами включён экранированный резистор R_s = 1,54 кОм.

ТАБЛИЦА 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ МЕР – ИМИТАТОРОВ ЁМКОСТИ 2 ПФ И ТАНГЕНСА УГЛА ПОТЕРЬ (ПРИ ЁМКОСТИ 4 ПФ)

Эталонные меры С и D	Клемма	U, кВ	Номинальное значение		Результаты измерений		Расчёт		Расхождение	
			C _x , пФ	D _x , 10^{-4}	С, пФ	D, 10^{-4}	С, пФ	D, 10^{-4}	по С, %	по D, 10^{-4}
КВМ-2	-	50	2	1	2,0028	1,1	2,0029	1,0	0,01	Менее 0,1
МПВ-5 № 01 и № 02 параллельно	1	10	4	0,6	4,0177	1,5	4,0220	1,5	-0,1	0
	1 + R _s		4	10	4,0180	11,6	4,0220	11,5	-0,1	0,1
	2		4	130	4,0172	130,4	4,0212	131,4	-0,1	-1,0
	3		4	1010	3,978	1012	3,981	1013	-0,1	-1

Из сравнения этих величин можно видеть, что расчётные и экспериментальные данные расходятся в пределах: 0,1 % по ёмкости и $1 \cdot 10^{-4}$ по тангенсу угла потерь. Расхождения вызваны упрощением расчётных формул (4) и (5) и кратковременной нестабильностью использованного делителя ДН-50ЕО, у которого нестабильность не нормируется из-за низкого класса точности. Полученная точность меры-имитатора достаточна для проверки измерителей среднего уровня точности (порядка 0,5 % по ёмкости и $(2-5) \cdot 10^{-4}$ по тангенсу угла потерь). Для проверки более точных измерителей следует в мере-имитаторе использовать ДН с меньшей погрешностью (например, серийно выпускаемые ёмкостные ДН с погрешностью 0,1 %) и аттестовать меру-имитатор с нужной точностью.

Для создания меры – имитатора ёмкостью 30 пФ можно использовать делитель ДН-10Е ($U = 10$ кВ, $K = 100$, $C_1 = 2,35$ нФ) и воздушную меру ёмкости P597 значением 3 нФ. Поскольку меры D при ёмкости 3 нФ не выпускаются, следует создать НВ составную меру D, подобрав резисторы в соответствии с ГОСТ Р 8.686-2009. Можно также использовать другой вариант, создавая меру - имитатор на 30 пФ на основе делителя ДН-3Е ($U = 3$ кВ, $K = 33$, $C_1 = 3,3$ нФ) и Блока проверки «Тангенс-2000» ($U = 10$ кВ, $C = 1,01 - 1,03$ нФ, $D = 1 \cdot 10^{-4}$; $1,3 \cdot 10^{-2}$; 0,1).

Предложенный метод позволяет создавать ВВ меры – имитаторы малой ёмкости и тангенса угла потерь (при малой ёмкости) любых значений в диапазоне ёмкости от 1 до 30 пФ и тангенса угла потерь от $1 \cdot 10^{-4}$ до 0,1. При этом используются существующие НВ меры, что

обеспечивает метрологическую прослеживаемость мер – имитаторов к НЧ государственным первичным эталонам единицы электрической ёмкости ГЭТ 25-79 и единицы угла потерь ГЭТ 143-85, обладающих большей точностью, чем такие же первичные эталоны при высоком напряжении [5].

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан метод создания высоковольтных мер – имитаторов малой ёмкости и мер – имитаторов тангенса угла потерь (при малой ёмкости), предназначенных для проверки высоковольтных измерителей этих величин.

Метод основан на использовании высоковольтного ёмкостного делителя напряжения, низковольтных мер ёмкости и мер тангенса угла потерь. Диапазон ёмкости создаваемых мер от 1 до 30 пФ, диапазон тангенса угла потерь от $1 \cdot 10^{-4}$ до 0,1. Проведены экспериментальные исследования меры – имитатора ёмкостью 2 пФ при напряжении 50 кВ и меры – имитатора тангенса угла потерь от $1 \cdot 10^{-4}$ до 0,1 при ёмкости 4 пФ и напряжении 10 кВ. Расчётные и экспериментальные значения совпали в пределах 0,1 % по ёмкости и $1 \cdot 10^{-4}$ по тангенсу угла потерь.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Klionsky M.D., Stepenkov V.V. "Multivalued high voltage loss angle standard," CPEM 2004 Conf. Digest, pp. 606-607, 2004.
- [2] J. Hällström, M. Klionsky, and E.-P. Suomalainen. Methods for comparison of loss angle standards at 10 kV level // CPEM-2012 Conf. Digest, 2012, pp.402-403.
- [3] Клионский М.Д., Шипелев К.И. Комплексный вторичный эталон единиц электрической ёмкости, тангенса угла потерь,

коэффициента масштабного преобразования и угла фазового сдвига при напряжении до 100 кВ. // 9-я н/т конф. «Энергия белых ночей». Метрология. Учет и контроль качества электрической энергии. Измерения в интеллектуальных сетях. 2018, Сборник докладов, С.-Петербург, с. 5-8.

[4] Клионский М.Д., Шипелев К.И. Исследование эталонных делителей напряжения методом компарирования токов. // 77 н/т

конференция СПб НТО РЭС им. А.С. Попова, посвящённая Дню радио: сб. докладов, 2022 СПб: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». с. 276-278. <https://conf-ntores.etu.ru/assets/files/2022/cp/pages/s11.html>

[5] Клионский М.Д. Повышение точности измерений тангенса угла потерь при высоких напряжениях с использованием первичного эталона // Труды XII Международной конференции Актуальные проблемы электронного приборостроения, АПЭП-2014, с. 45-48.