

Исследование эталонных делителей напряжения методом компарирования токов

М. Д. Клионский, К. И. Шипелев

Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева
m.d.klionsky@vniim.ru, k.i.shipelev@vniim.ru

Аннотация. Метод компарирования токов является наиболее точным при измерении электрических параметров высоковольтных ёмкостных делителей напряжения (ДН), позволяет проводить поверку этих средств измерений (СИ) при любом коэффициенте масштабного преобразования. Метод включен в государственную поверочную схему для СИ коэффициента масштабного преобразования и угла фазового сдвига (2019 г.). Однако стандартизованная методика поверки ДН этим методом отсутствует. Предлагается метод измерений, основанный на трёх измерениях ёмкости и тангенса угла потерь электрической цепи различной конфигурации с использованием высоковольтного моста с трансформаторным компаратором токов. Метод реализуется с помощью компьютерной программы, входящей в комплект моста. Приводятся расчётные формулы и результаты исследований. Точность результатов измерений позволяет применить метод для поверки эталонных ДН.

Ключевые слова: метод компарирования токов, высоковольтный делитель напряжения, коэффициент масштабного преобразования, угол фазового сдвига

I. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В связи с утверждением новой государственной поверочной схемы (ГПС) для высоковольтных средств измерений (СИ) коэффициента масштабного преобразования K и угла фазового сдвига ϕ (декабрь 2019) повысились требования к точности измерений параметров эталонных трансформаторов и ёмкостных делителей напряжения (ТН и ДН). Пределы допускаемой погрешности (ПГ) для величин K и ϕ соответственно составляют: для СИ 1 разряда от 0,015 % до 0,05 % и от 0,3 до 1 мин; для СИ 2 разряда – от 0,05 % до 0,1 % и от 0,9 до 3 мин.

Наиболее распространённым методом поверки ТН и ДН является метод сличения с более точным ТН или ДН. Однако высокоточные ТН и ДН (напр., классов точности 0,01–0,02) малодоступны. Подобрать эталон с таким же масштабным коэффициентом, что и у поверяемого СИ, не всегда возможно. Кроме того, при поверке ДН методом сличения появляется дополнительная ПГ по углу фазового сдвига из-за влияния импеданса входных цепей прибора сравнения. Эти недостатки отсутствуют в методе компарирования токов (метод разработан НПО «ИСАРИ», г. Тбилиси в семидесятых годах прошлого века).

Метод компарирования токов является наиболее точным при поверке ТН и ДН, позволяет проводить поверку этих СИ при любом коэффициенте масштабного преобразования [1]. Метод включён в ГПС и применяется как в государственном первичном эталоне (ВНИИМС), так и в ряде вторичных эталонов (ВНИИМ, НПП «Марс-Энерго»). Методика поверки ТН методом компарирования токов приводится в ГОСТ 8.216-2011, однако для поверки ДН этим методом стандартизованная методика отсутствует.

II. ТРЕБОВАНИЯ К ЭТАЛОННЫМ СРЕДСТВАМ ИЗМЕРЕНИЙ

В ВНИИМ для проведения поверки ТН и ДН методом компарирования токов применяют следующие СИ [2]: высоковольтный (ВВ) автоматический мост переменного тока СА7100М1 (метрологический вариант), изготовитель ф. ОЛТЕСТ, г. Киев. ПГ моста составляют: 0,002 % по ёмкости C и $2 \cdot 10^{-5}$ по тангенсу угла потерь D ; газонаполненные измерительные конденсаторы КГИ на рабочие напряжения от 10 до 230 кВ с номинальной ёмкостью от 50 до 300 пФ производства фирм «Высоковольтная техника» и ИП И.Е. Семушин, г. С.-Петербург; две низковольтные (НВ) меры ёмкости 10 и 100 нФ разработки ВНИИМ с рабочим напряжением от 1 до 120 В, мера ёмкости с воздушным диэлектриком 4 нФ, сохраняющая своё значение в диапазоне напряжения от 10 до 400 В. Доверительная ПГ ($p=0,95$) используемых мер по ёмкости составляет 0,002 % при частоте 50 Гц, значение D составляет $1 \cdot 10^{-4}$ и менее.

III. МЕТОД ИЗМЕРЕНИЙ

Для поверки ТН методом компарирования токов применяют в соответствии с ГОСТ 8.216-2011 методику двух измерений, основанную на использовании ёмкостного моста с трансформаторным компаратором токов. Проведенный анализ показал, что эта методика также может быть использована для поверки ДН при условии проведения дополнительного (третьего) измерения. Ниже рассматривается предлагаемая методика трёх измерений с использованием программы управления мостом при поверке ТН, включенной в комплект поставки моста (по заказу).

1-е измерение – измеряют параметры НВ меры ёмкости. В канал C_x моста включают НВ меру ёмкости $C_{НВ}$, в канал C_o включают ВВ измерительный конденсатор $C_{ВВ}$ (рис. 1а).

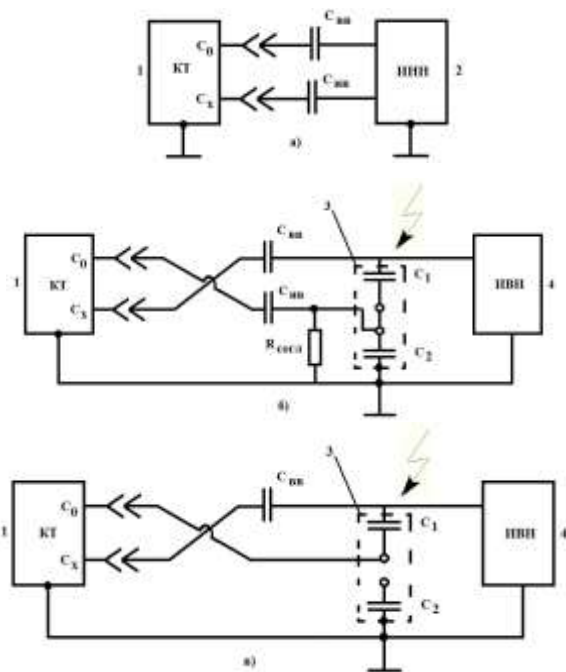


Рис. 1. Электрическая схема при измерении параметров ёмкостного делителя напряжения методом 3-х измерений: 1 – компаратор токов (мост); 2 – источник низкого напряжения; 3 – измеряемый делитель напряжения; 4 – источник высокого напряжения

В поле ввода программы моста заносят следующие величины: в строку C_0 , $\text{tg } \delta_0$ – значения ёмкости и тангенса угла потерь ВВ конденсатора, в строку $C_{к(но)}$ – сумму ёмкости кабеля и ёмкости на корпус с низковольтного гнезда НВ меры, в строку $C_{к(во)}$ – сумму ёмкости кабеля и ёмкости на корпус НВ гнезда ВВ конденсатора. На мост подают напряжение 100 В и измеряют отношение плеч моста M_1 и угол фазового сдвига φ_1 . В качестве НВ меры ёмкости $C_{нв}$ используют меру 10 нФ, в качестве C_0 следует использовать ВВ конденсатор ёмкостью свыше 100 пФ, например, КГИ-42-1-300 (42 кВ, 300 пФ), иначе из-за низкого значения тока в канале C_0 чувствительность моста окажется недостаточной. Проведение измерений при напряжении 100 В связано с тем, что выходное напряжение делителей напряжения обычно составляет 100 В или имеет близкое к нему значение. Учёт ёмкостей $C_{к(но)}$ и $C_{к(во)}$, нагружающих компаратор токов, позволяет повысить точность измерений угла фазового сдвига ДН. Результаты измерений отображаются на мониторе (M_1 и φ_1).

Если поверяемый ДН имеет верхний предел измерительного напряжения свыше 40 кВ, то в качестве ВВ конденсатора следует использовать конденсатор с более высоким предельным напряжением, напр., КГИ-230-1-50 (230 кВ, 50 пФ). Для обеспечения необходимой чувствительности моста при ёмкости 50 пФ необходимо подать на мост более высокое напряжение (свыше 100 В). Поэтому в качестве НВ меры ёмкости используют меру 4 нФ, а на мост подают напряжение 400 В и измеряют те же параметры M_1 и φ_1 .

2-е измерение – измеряют параметры делителя с подключенной к нему НВ мерой ёмкости. Источник низкого напряжения отсоединяют и подключают источник высокого напряжения. Между источником высокого напряжения и НВ мерой включают ДН и переставляют измерительные кабели в мосте, т. е. кабель C_x включают в канал C_0 , кабель C_0 включают в канал C_x (рис. 1б).

В поле ввода программы заносят следующие величины: в строку $C_{к(но)}$ – значение, равное сумме ёмкости кабеля и ёмкости на корпус НВ гнезда ВВ конденсатора, в строку $C_{к(во)}$ – значение, равное сумме ёмкости кабеля и расчетной ёмкости C_p между высоковольтным выводом ДН и гнездом C_0 . Ёмкость C_p определяют путем преобразования в треугольник «звезды» из трех ёмкостей: ёмкости НВ меры $C_{нв}$, и двух ёмкостей C_1 и C_2 , образующих плечи делителя. Обычно значение ёмкости C_p близко к значению ёмкости низковольтной меры $C_{нв}$. Делитель включают в измерительную цепь моста вместе с штатным измерительным кабелем, а на выходе кабеля между внутренним и заземлённым внешним проводниками устанавливают согласующий резистор $R_{согл}$ (сопротивление резистора указано в РЭ на делитель, для многих ДН оно составляет 1 МОм).

Подают напряжение в диапазоне от 10 % до 100 % от номинального напряжения ($U_{ном}$) делителя ДН и измеряют отношение плеч моста M_2 и угол фазового сдвига φ_2 . Результаты измерений отображаются на мониторе. Дополнительно на мониторе отображается величина f_1 , представляющая в данном случае одну из составляющих погрешности по напряжению коэффициента масштабного преобразования (коэффициента деления), рассчитанная по формуле, %:

$$f_1 = (1 - M_1 \cdot M_2 / K_{ном}) \cdot 100, \quad (1)$$

где $K_{ном}$ – номинальный коэффициент деления.

На мониторе наряду с величиной f_1 отображается также суммарный угол фазового сдвига $\gamma_2 = \varphi_1 + \varphi_2$, но эта величина не используется.

3-е измерение – измеряют параметры ВВ плеча делителя ДН. В мосте измерительные кабели оставляют переставленными, в канале C_0 отсоединяют НВ меру ёмкости и (при возможности) НВ плечо ДН, оставляют включённым только ВВ плечо ДН (рис. 3в). Если отключение НВ плеча ДН конструктивно не предусмотрено, и НВ плечо остаётся в измерительной цепи, то его присутствие учитывают в значении ёмкости $C_{к(во)}$.

В поле ввода программы заносят следующие величины: в строку $C_{к(но)}$ – значение, равное сумме ёмкости кабеля и ёмкости на корпус с НВ гнезда ВВ конденсатора (как было при 2-м измерении), в строку $C_{к(во)}$ – значение, равное сумме ёмкости кабеля и ёмкости C_p . Измеряют отношение плеч моста M_3 и угол фазового сдвига φ_3 . На мониторе появляется новое значение погрешности по напряжению f_2 , %:

$$f_2 = (1 - M_1 \cdot M_3 / K_{ном}) \cdot 100 \quad (2)$$

Иногда 3-е измерение следует проводить, вернув измерительные кабели в нормальное положение (как на рис. 1а). Это происходит, когда мост сигнализирует о том, что значение тока через конденсатор в канале C_0 превышает допустимое значение. В этом случае измеряют отношение плеч моста M_4 и угол фазового сдвига φ_4 .

IV. РАСЧЁТНЫЕ ВЫРАЖЕНИЯ

Определяют коэффициент деления K_x и погрешность по напряжению коэффициента деления f_3 , %, по формулам:

$$K_x = M_1 \cdot M_2 - M_1 \cdot M_3 \quad (3)$$

$$f_3 = 100 + f_1 - f_2 \quad (4)$$

Угловую погрешность рассчитывают по формуле:

$$\gamma_3 = [(\varphi_2 \cdot M_2 / M_3 - \varphi_3) / (M_2 / M_3 - 1)] + \varphi_1 \quad (5)$$

Если 3-е измерение проводится при нормальном положении кабелей, то расчеты ведут по формулам:

$$K_x = M_1 \cdot M_2 - M_1 / M_4 \quad (6)$$

$$\gamma_3 = [(\varphi_2 \cdot M_2 \cdot M_4 + \varphi_4) / (M_2 \cdot M_4 - 1)] + \varphi_1 \quad (7)$$

Погрешность по напряжению f_4 здесь следует рассчитать по формуле, %

$$f_4 = (1 - K_x / K_{ном}) \cdot 100 \quad (8)$$

V. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве примера приводим обработку результатов измерений при исследовании делителя ДН-50ЕО ($U_{ном}=50$ кВ, $K_{ном}=500$) при напряжении 40 кВ. Действительные значения коэффициента деления и угла фазового сдвига, указанные в свидетельстве о поверке, составляют:

$K_{дейст} = 501,7$; $\varphi = -2,03 \cdot 10^{-4}$ рад = -0,70 мин (значения получены в 2021 г. без использования рассматриваемой методики).

При исследовании с помощью приведенной методики трех измерений получены результаты, представленные в табл. 1 и 2.

ТАБЛИЦА I РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ (НА МОНИТОРЕ)

1 измерение		2 измерение		
M_1	φ_1 , мин	M_2	φ_2 , мин	f_1 , %
31,975	0,335	16,005	-1,281	-2,354
3 измерение				
M_3	φ_3 , мин	f_2 , %		
0,31265	-23,23	98,001		

ТАБЛИЦА II РАССЧИТАННЫЕ ДАННЫЕ

$M_1 \cdot M_2$	$M_1 \cdot M_3$	M_2 / M_3	K_x	f_3 , %	γ_3 , мин
511,76	9,9984	51,191	501,76	-0,35	-0,51

Расхождение результатов измерений с ранее полученными данными составляет весьма малые величины: по коэффициенту деления менее 0,1 %, по углу фазового сдвига около 0,2 мин. Эти величины соответствуют требованиям, предъявляемым к точности измерений параметров эталонов единиц коэффициента масштабного преобразования и угла фазового сдвига 1 и 2 разрядов.

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённое исследование показывают работоспособность рассматриваемой методики измерений, возможность её реализации через программу управления мостом. Методика может применяться для поверки эталонных делителей напряжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Клионский М.Д. Измерение масштабного коэффициента и угла фазового сдвига эталонных трансформаторов и делителей напряжения. 71-я Всероссийская н/т конф., посвящённая Дню радио: Сборник трудов, С.-Петербург, 2016 г., Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», с. 435-437.
- [2] Клионский М.Д., Шипелев К.И. Комплексный вторичный эталон единиц электрической емкости, 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.