

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЙ МАЛЫХ ТАНГЕНСОВ УГЛОВ ПОТЕРЬ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АКТИВНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

П.И.Борщев, канд.техн.наук
Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

Обоснована целесообразность использования резисторов вместо мер электрической емкости для определения аддитивных составляющих погрешностей измерения фаз и тангенсов углов потерь в селективных измерителях комплекса электрических величин на промышленной частоте. При этом существенно расширяется диапазон значений силы входных токов, а также появляется возможность определения погрешностей для комбинации напряжения и тока на входах прибора. Указаны допустимые диапазоны сопротивлений резисторов. Приведены рекомендации по применению моста переменного тока для экспериментального определения тангенсов фазовых углов резисторов на промышленной частоте. Библи. 3, табл. 2, рис. 2.

Ключевые слова: измерение, промышленная частота, тангенс угла потерь, мера тангенса угла потерь, емкость, активное сопротивление.

Для диагностики состояния электроэнергетического оборудования все шире используются селективные измерители, выполняющие измерение комплекса электрических величин на промышленной частоте [1]. Такие приборы осуществляют непосредственное измерение действующих значений первых гармоник двух входных сигналов: переменных напряжений, переменных токов, либо их комбинации, а также частоты и разности фаз этих сигналов. По результатам прямых измерений расчетным путем определяются величины, необходимые для диагностики оборудования: диэлектрические параметры изоляции, полная мощность и ее составляющие в разных режимах работы оборудования, параметры электрического импеданса и т.д.

Важное место среди этих величин занимают диэлектрические параметры высоковольтной изоляции – емкость и тангенс угла диэлектрических потерь. Требования к точности измерения тангенса угла потерь, обусловленные параметрами контролируемой изоляции, достаточно высоки, в особенности в области малых значений этой величины. Аддитивная составляющая погрешности измерения тангенса угла потерь должна быть не более 10^{-4} . Соответственно, погрешность воспроизведения малых значений величины при поверке прибора не должна превышать $3,3 \cdot 10^{-5}$. Такую точность нужно обеспечить, во-первых, в широком диапазоне значений емкости – от единиц пикофарад до десятков микрофарад, а во-вторых, на низкой частоте.

Традиционно погрешность измерения тангенса угла потерь определяли с помощью двух мер емкости, одна из которых включалась вместо образцового конденсатора, а вторая – вместо объекта измерения. При этом обе меры емкости должны иметь собственный тангенс угла потерь, удовлетворяющий указанным требованиям. Однако применение такой методики на промышленной частоте связано со значительными трудностями. Наименьшее значение тангенса угла потерь, согласно [3], имеют меры РЭЕ, Р5050 и Р597. Однако номинальные емкости мер первых двух типов ограничены значением 1000 пФ. А у мер Р597 тангенс угла потерь составляет в зависимости от номинальной емкости от $5 \cdot 10^{-5}$ до 10^{-3} и нормируется только на частоте 1000 Гц. При снижении частоты емкостная проводимость снижается, а активная проводимость, обусловленная, в частности, утечками изоляции, сохраняет свое значение, что и приводит к росту тангенса угла потерь.

Для поверки мостов переменного тока разработаны специальные методики, позволяющие применить указанные меры емкости для определения аддитивной составляющей погрешности измерения тангенса угла потерь на уровне 10^{-4} . В частности, при поверке высоковольтного автоматического моста переменного тока СА7100 для определения погрешности при равных значениях емкостей меры и объекта вначале включают одну меру емкости вместо образцового конденсатора, а вторую – вместо объекта, измеряют тангенс угла потерь, затем меняют их местами и вновь производят измерение. Погрешность вычисляют как разность показаний прибора по абсолютной величине в первом и втором случаях. Для определения изменений погрешности при переключениях диапазонов произво-

дят измерение емкости одной и той же меры, но в разных диапазонах. Для определения изменений погрешности в пределах диапазона производят поочередно измерение тангенса угла потерь двух конденсаторов равной емкости, а затем – при параллельном включении этих конденсаторов.

Применение описанных методов имеет свои ограничения, связанные с узким диапазоном значений силы переменного тока, допускаемого для используемых мер емкости. В частности, у мер Р597 максимальная допустимая сила тока на частоте 50 Гц составляет около 6 мА, в то время как старший диапазон силы входного тока у рассматриваемых селективных измерителей комплекса величин на промышленной частоте составляет от 100 мА до 5 А.

Специфика рассматриваемых селективных измерителей электрических величин такова, что тангенс угла потерь определяется по разности фаз входных сигналов. Таким образом, нет принципиальной разницы, с помощью каких именно элементов задавать разность фаз между входными переменными токами. Поэтому существенно лучших результатов удастся достичь, если использовать для формирования входных токов резисторы вместо мер емкости. Первое преимущество такого решения: в определенном диапазоне номинальных значений резисторы имеют весьма малые собственные фазовые сдвиги между приложенным напряжением и протекающим током. Второе – указанный фазовый сдвиг уменьшается с уменьшением частоты, поскольку снижается влияние реактивных составляющих импеданса. В [2] приведены данные, характеризующие частотные свойства наиболее распространенных типов резисторов производства стран СНГ. Отмечено, что лучшие частотные свойства имеют непроволочные, в частности, металлодиэлектрические и металлопленочные резисторы. Благодаря отсутствию обмоток индуктивность таких резисторов минимальна и определяется, в основном, индуктивностью монтажа. Третье преимущество – более широкий диапазон значений силы тока. Например, для резисторов сопротивлением 10 Ом, допустимой мощностью 2 Вт максимальная сила тока составляет 447 мА, что почти на два порядка превышает допустимую силу тока для мер емкости.

Как указывалось выше, для решения поставленной задачи нужно, чтобы тангенс фазового угла между приложенным напряжением и протекающим током не превышал $3,3 \cdot 10^{-5}$. Для оценки допустимой области номинальных сопротивлений воспользуемся эквивалентной электрической схемой, достаточно точно описывающей поведение резистора на переменном токе. Схема показана на рис. 1, где L_M – индуктивность выводов и монтажных проводников, R – сопротивление резистора, C_C – собственная емкость резистора.

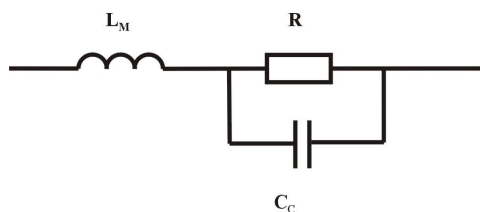


Рис. 1

Очевидно, что для обеспечения малого фазового угла частота приложенного напряжения должна быть существенно ниже частоты собственного резонанса резистора. Поэтому резонансными явлениями можно пренебречь. Тангенс фазового угла резистора можно определить таким образом:

$$D \approx 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \left(\frac{L_M}{R} - R \cdot C_C \right), \quad (1)$$

где D – тангенс фазового угла резистора, f – частота приложенного напряжения и протекающего через резистор тока.

Практически во всех случаях можно обеспечить, чтобы значение индуктивности монтажа не превышало 1 мкГн. Отсюда следует первое ограничение на значения сопротивлений. Для того чтобы на частоте 50 Гц тангенс фазового угла резистора не превышал $3,3 \cdot 10^{-5}$, сопротивление резистора должно удовлетворять условию $R \geq 10$ Ом.

Ограничение на максимальное значение сопротивления определяется собственной емкостью резисторов и емкостями электрического монтажа. В [2] указано, что существуют непроволочные резисторы (типов С2-6, С2-33), у которых эта емкость не превышает 0,3 пФ независимо от номинальной мощности. Емкость монтажа можно снизить путем оптимального размещения элементов и их экранирования. Практически можно добиться, чтобы емкость, включенная параллельно резистору, не превысила 1 пФ. Отсюда получаем второе ограничение на область номинальных сопротивлений $R \leq 105$ кОм.

Указанные ограничения обусловлены собственными параметрами резисторов. Кроме них возникают ограничения, обусловленные влиянием входных цепей рассматриваемых приборов. Эквивалентная электрическая схема одного входа прибора при формировании входного тока с помощью резистора показана на рис. 2, где U – испытательное напряжение, R – сопротивление резистора, используемого в качестве меры тангенса угла потерь, R_{IV} – активное сопротивление входа прибора, C_{IV} –

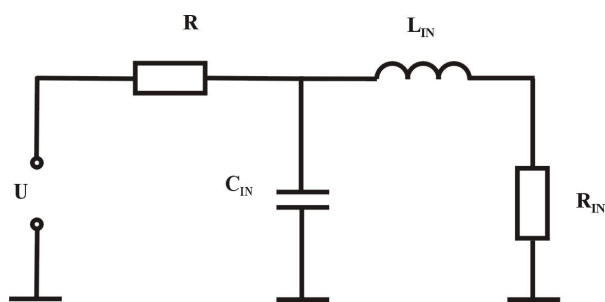


Рис. 2

суммарная входная емкость (включает емкость конденсатора входного фильтра и емкость соединительного кабеля), L_{IN} – индуктивность катушки входного фильтра.

Максимальные значения параметров элементов входной цепи прибора для различных диапазонов измерения силы входных токов показаны в табл. 1. Приведенная емкость является суммой емкости соединительного кабеля и емкости фильтра, включенной на входе прибора (150 пФ для диапазонов «1 мА» и «100 мА»). Предполагаем, что ка-

бели обладают погонной емкостью не более 100 пФ/м. Для работы в диапазонах «1 мА» и «100 мА» используется кабель длиной 1,5 м, для работы в диапазоне «5 А» – кабель длиной 1 м.

Таблица 1

Диапазон измерения силы тока	C_{in} , пФ	R_{in} , Ом	L_{in} , мкГн
1 мА	300	11	220
100 мА	300	12	110
5 А	100	0,2	менее 1

блужденных к каналам «0» и «X» прибора, одинаковы, и одинаковы параметры входных цепей каналов, то фазовые сдвиги между входными токами также будут одинаковыми, и погрешности воспроизведения нулевого фазового сдвига, а равно и тангенса угла потерь, не возникает. Погрешность задания нулевого фазового сдвига обусловлена разностью фазовых сдвигов, которые возникают во входных цепях прибора. Следовательно, максимальный фазовый сдвиг на одном из входов будет являться оценкой максимальной фазовой погрешности, обусловленной влиянием входных цепей прибора.

Определим напряжение на резисторе R_{IN} в комплексной форме

$$U_{IN} = (UR_{IN} / R)(1 + R_{IN} / R - 4\pi^2 f^2 L_{IN} C_{IN} + j2\pi f R_{IN} C_{IN} + j2\pi f L_{IN} / R)^{-1}, \quad (2)$$

где j – мнимая единица.

В числителе выражения – идеальный коэффициент передачи. Угол фазового сдвига, обусловленный влиянием параметров входной цепи, определяется знаменателем выражения (2). Тангенс этого угла является оценкой погрешности воспроизведения нулевого тангенса угла потерь

$$\Delta D = \frac{2\pi f R_{IN} C_{IN} + 2\pi f L_{IN} / R}{1 + R_{IN} / R - 4\pi^2 f^2 L_{IN} C_{IN}}. \quad (3)$$

Слагаемое в знаменателе, содержащее вторую степень частоты, при указанных в табл. 1 значениях емкости и индуктивности пренебрежимо мало по сравнению с единицей. Если учесть, что имеет смысл использовать в качестве мер резисторы, сопротивление которых существенно больше входного сопротивления прибора, то в знаменателе можно пренебречь всеми членами, кроме единицы.

Значение первого слагаемого в числителе не превышает $1,2 \cdot 10^{-6}$, т.е. почти в сто раз меньше нормированной погрешности прибора. Им также пренебрегаем.

Выражение погрешности принимает следующий вид:

$$\Delta D \approx 2\pi f L_{IN} / R. \quad (4)$$

Для того, чтобы погрешность задания нулевого тангенса не превышала $3,3 \cdot 10^{-5}$, сопротивления резисторов, используемых в качестве мер тангенса угла потерь, должны превышать значения, указанные в табл. 2.

Таблица 2

Диапазон измерения силы тока	Минимально допустимое сопротивление меры
1 мА	2100 Ом
100 мА	1050 Ом
5 А	10 Ом

Для практического определения аддитивных составляющих погрешностей измерения тангенса угла потерь и разности фаз целесообразно использовать специально изготовленные наборы резисторов, нормированные по фазовому сдвигу между напряжением и током. Экспериментально подтвердить, что фазовый угол каждого резистора не превышает заданной величины, можно с помощью прецизионного моста переменного тока. Для уменьшения влияния собственной погрешности моста измерения необходимо проводить на частоте, существенно превышающей 50 Гц.

В качестве примера определим частоту, на которой необходимо измерять тангенс фазового угла резисторов мостом переменного тока Р5083. Предел допускаемого значения абсолютной погрешности измерения мостом Р5083 тангенса угла фазового сдвига активных электрических сопротивлений определяется в соответствии с «Техническим описанием» этого прибора из следующего выражения:

$$\Delta D_M = \pm(a + bD)KM_2, \quad (5)$$

где a , b – аддитивная и мультипликативная составляющие погрешности, D – измеряемое значение тангенса, K – коэффициент, зависящий от напряжения на объекте и частоты, M_2 – коэффициент, учитывающий соотношение нормальной и рабочей частот и нарушение квадратуры между током и напряжением в цепи измеряемого объекта. Этот коэффициент в свою очередь находят из выражения

$$M_2 = (1 + kD(1 + D))F_2, \quad (6)$$

где k – коэффициент, зависящий от диапазона измерения и измеряемой величины; F_2 – коэффициент, зависящий от частоты. Для частот более 1 кГц он определяется следующим образом:

$$F_2 = 1 + q(f / f_H - 1)^2, \quad (7)$$

где q – коэффициент, зависящий от диапазона измерений и измеряемой величины, f – рабочая частота, f_H – фиксированная нормальная частота.

При $D=0$ выражение (7) с учетом (8) и (9) принимает вид

$$\Delta D_M = \pm aK(1 + q(f / f_H - 1)^2). \quad (8)$$

Для частот от 0,9 кГц до 19,9 кГц, если на объект подается полное напряжение, $a=5 \cdot 10^{-4}$, $K=1$, для частот от 1 кГц до 100 кГц и сопротивлений от 1 кОм до 99,9 кОм $q=0,1$, для диапазона частот от 1 кГц до 100 кГц частота $f_H=1,00$ кГц. После подстановки указанных значений получаем

$$\Delta D_M = \pm 5 \cdot 10^{-4} \cdot (1 + 0,1 \cdot (f - 1)^2), \quad (9)$$

где f – значение рабочей частоты, кГц.

Учитывая, что тангенс фазового угла резистора уменьшается пропорционально уменьшению частоты, погрешность измерения тангенса угла фазового сдвига для рабочей частоты f можно с учетом (9) привести к частоте 50 Гц по формуле

$$\Delta D_{50} = \pm 0,05 \cdot 5 \cdot 10^{-4} \cdot (1 + 0,1 \cdot (f - 1)^2) / f. \quad (10)$$

Величина, определяемая (10), имеет минимум, приблизительно соответствующий частоте 3 кГц, т.е. для поставленной задачи частота 3 кГц является оптимальной. Погрешность измерения тангенса фазового угла на частоте 3 кГц, приведенная к частоте 50 Гц, составляет приблизительно $1,17 \cdot 10^{-5}$, что примерно в три раза меньше определяемого значения.

Выводы. При проверке селективных измерителей комплекса электрических величин на промышленной частоте для экспериментального определения аддитивных составляющих погрешностей измерения разности фаз между входными токами и тангенса угла потерь целесообразно вместо мер электрической емкости использовать металлопленочные либо металлодиэлектрические резисторы. Указанная замена обеспечивает существенное расширение диапазона значений силы входных токов, а также позволяет определять погрешности измерения фазовых углов при подаче на входы прибора комбинации напряжения и тока.

Ограничения на значения сопротивлений резисторов определяются как собственными паразитными параметрами резисторов, так и параметрами входных цепей поверяемых приборов. В результате проведенного анализа определено, что целесообразно использовать резисторы сопротивлением меньше 100 кОм, при этом минимальные допустимые значения зависят от диапазона измеряемой силы тока (приведены в табл. 2).

Экспериментально проверить значения тангенсов фазовых углов резисторов можно с помощью моста переменного тока, при этом для снижения влияния погрешности моста измерения нужно проводить на частоте, превышающей промышленную. Конкретное значение частоты зависит от метрологических параметров моста. В частности, для моста Р5083 оптимальное значение частоты составляет 3 кГц.

1. Борщев П.И. Селективный измеритель электрических величин на промышленной частоте // Техн. электродинамика. – 2005. – № 4. – С. 74–78.
Borshchov P.I. Selective measurer of electrical quantities on the commercial frequency// Tekhnichna elektrodynamika. – 2005. – № 4. – P. 74–78. (Rus.)
2. Дубровский В.В., Иванов Д.М., Пратусевич Н.Я. и др. Резисторы / Справочник. Под ред. И.И.Четверикова и В.М.Терехова. – М.: Радио и связь, 1991. – 528 с.
Dubrovskii V.V., Ivanov D.M., Pratusевич N.Ya. a. o. Resistors: Reference book. – Moskva: Radio i sviaz, 1991. – 528 p. (Rus.)
3. ДСТУ ГОСТ 8.255:2009. ГСИ. Меры электрической емкости. Методы и средства поверки (чинний в Україні). – К.: Держспоживстандарт України, 2009. – 26 с.
DSTU GOST 8.255:2009. Electrical capacity measures. Verification procedure. – Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2009. – 26 p. (Rus.)

УДК 621.317

П.І.Борщов, канд.техн.наук

**Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна**

Визначення похибок вимірювань малих тангенсів кутів втрат з використанням активних опорів

Обґрунтовано доцільність використання резисторів замість мір електричної ємності для визначення адитивних складових похибок вимірювання фаз та тангенсів кутів втрат в селективних вимірювачах комплексу електричних величин на промисловій частоті. При цьому суттєво розширюється діапазон сили вхідних струмів, а також з'являється можливість визначення похибок для комбінації напруги та струму на входах приладу. Вказано допустимі діапазони опорів резисторів. Наведено рекомендації щодо застосування моста змінного струму для експериментального визначення тангенсів фазових кутів резисторів на промисловій частоті. Бібл. 3, табл. 2, рис. 2.

Ключові слова: вимірювання, промислова частота, тангенс кута втрат, міра тангенсу кута втрат, ємність, активний опір.

Borshchev P.I.

**Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,
Peremogy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine**

Error estimation of measurements of small tangents of loss angles using active resistances

Expediency of the usage of resistors instead of the measures of capacitance for determination of adaptive error components of phase measurements and tangents of loss angles in selective meters of electrical quantity complex at the mains frequency is substantiated. At the same time the value range of input current strength is extended and the capability of error estimation for combination of voltage and current at the device's inputs appears. The admissible resistance range of resistors is indicated. Recommendations on application of AC bridge for experimental determination of tangents of resistor phase angles at the mains frequency are given. References 3, tables 2, figures 2.

Key words: measuring, commercial frequency, dissipation factor, measure of dissipation factor, capacity, active resistance.

Надійшла 19.05.2010

Received 19.05.2010