

УДК 681.586

*В. С. Астремский***УСТРОЙСТВО ИЗМЕРЕНИЯ ЕМКОСТИ
ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРА***V. S. Astremskiy***DEVICE CAPACITANCE MEASUREMENT
OF TRANSFORMER WINDINGS**

А н н о т а ц и я. Рассмотрены особенности измерения емкости обмоток высоковольтного импульсного трансформатора. Проведен сравнительный анализ результатов измерения и моделирования. Предложено устройство для измерения электрических емкостей изоляции обмоток двухобмоточного трансформатора.

A b s t r a c t. This article describes the features of the high-capacitance measurement windings of the pulse transformer. A comparative analysis of the results of measurements and modeling. A device for measuring electrical capacitance two-winding transformer winding insulation.

К л ю ч е в ы е с л о в а: трансформатор, обмотка, расчет напряжения.

К e y w o r d s: transformer, winding, voltage calculation.

Измерение электрической емкости обмоток трансформатора производится, прежде всего, для контроля состояния трансформаторов и используется при диагностировании повреждений обмоток, которые, например, могут быть вызваны коротким замыканием.

При внезапном коротком замыкании трансформатора в его обмотках возникают механические усилия, стремящиеся растянуть наружную обмотку и сжать внутреннюю. Кроме того, между витками одной и той же обмотки действуют усилия, которые стремятся сжать обмотку по высоте. Эти силы способны деформировать обмотки, что может привести к аварии трансформатора. Поэтому необходим периодический контроль состояния обмоток трансформатора. О геометрии обмоток можно судить по значению их индуктивности, измеряя сопротивление короткого замыкания. Однако более эффективным и чувствительным методом оценки состояния обмоток трансформатора является измерение их емкостей относительно «земли» и относительно друг друга. Этот метод весьма чувствителен даже к небольшим изменениям геометрии обмоток, что выгодно отличает его от традиционного метода измерения сопротивления короткого замыкания.

Известно устройство для измерения эффективной электрической емкости методом амперметра и вольтметра, а также с помощью фарадометра, куметра и моста переменного тока [1–3]. Недостатками этих устройств являются наличие подвижных механических частей и невысокое быстродействие.

Наиболее близким техническим решением – прототипом к предлагаемому изобретению – является устройство для измерения электрической емкости [4], содержащее источник синусоидального напряжения, эталонный резистор, усилитель, индикатор, два выходных вывода, в которых первый вывод эталонного резистора соединен с первым выводом источника синусоидального напряжения, второй вывод эталонного резистора – с первым выходным выводом устройства и входом усилителя, выход которого соединен с входом индикатора.

Суть его заключается в том, что емкость измеряется на основе метода амперметра и вольтметра. Здесь под термином «емкость» C будем понимать, как это принято в [4], эффективную емкость, определяющую полное сопротивление конденсатора при данной угловой частоте ω :

$$C = \frac{1}{\omega Z} = \frac{I}{\omega U}. \quad (1)$$

При известном напряжении U и угловой частоте ω ток в цепи пропорционален измеряемой эффективности емкости C : $I = \omega UC = kC$, где k – коэффициент пропорциональности. Далее термин «эффективная» перед словом «емкость» будем опускать. При низких частотах индуктивностью конденсаторов можно пренебречь. Поэтому при малых значениях индуктивности и $\text{tg}\delta$ значение емкости C будет совпадать с значением емкости в последовательной и параллельной схемах замещения.

Недостатком указанного устройства является то, что измерение с его помощью емкостей объекта, имеющего три вывода, между каждым из которых и двумя остальными выводами имеется электрическая емкость, связано со сложными вычислениями на основании результатов трех измерений. Поясним процесс измерения емкостей (рис. 1).

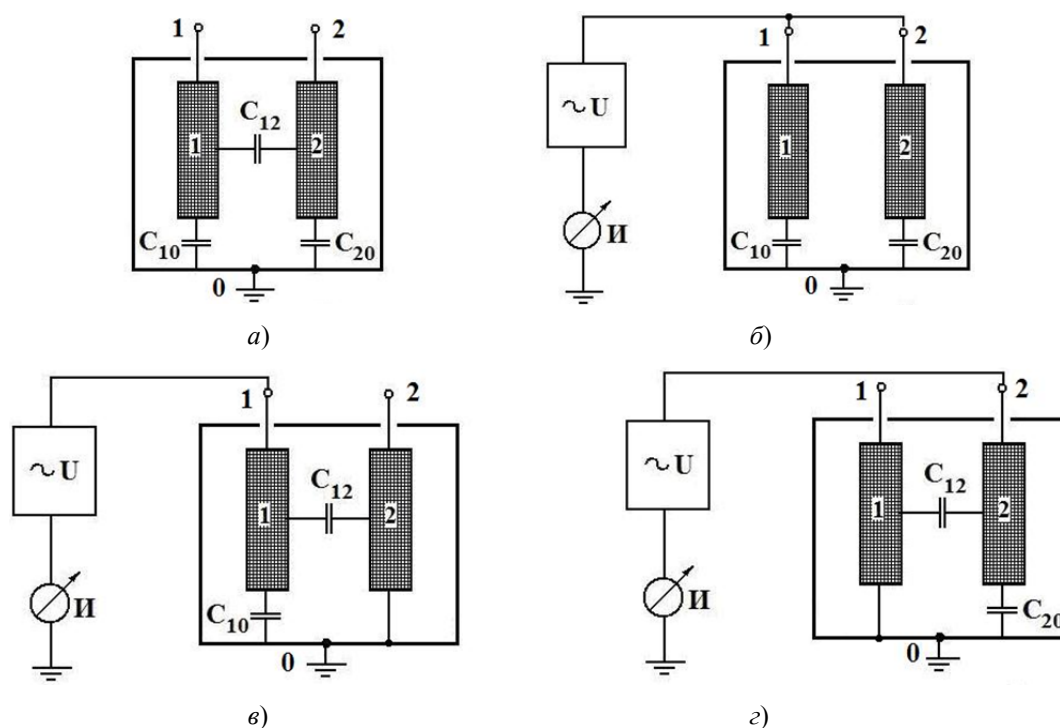


Рис. 1. Схемы измерения электрических емкостей изоляции обмоток двухобмоточного трансформатора: θ – вывод корпуса трансформатора; 1 – вывод первой обмотки трансформатора; 2 – вывод второй обмотки трансформатора; C_{10} – емкость первой обмотки относительно корпуса; C_{20} – емкость второй обмотки относительно корпуса; C_{12} – емкость первой обмотки относительно второй

Для определения емкостей, как это видно из рис. 1, а, необходимо выполнить три измерения емкостей:

- 1) между точками 1 и 2

$$C_1 = C_{12} + \frac{C_{10}C_{20}}{C_{10} + C_{20}}; \quad (2)$$

- 2) между точками 1 и θ

$$C_2 = C_{10} + \frac{C_{12}C_{20}}{C_{12} + C_{20}}; \quad (3)$$

3) между точками 2 и 0

$$C_3 = C_{20} + \frac{C_{12}C_{10}}{C_{12} + C_{10}}. \quad (4)$$

Далее, используя полученные при измерении значения C_1 , C_2 и C_3 , решая уравнения (2)–(4), определяют искомые значения емкостей C_{12} , C_{10} и C_{20} .

При измерении по первой схеме, показанной на рис. 1,б, испытательное напряжение подано на обе обмотки 1 и 2, их потенциалы будут равны и емкостный ток между обмотками протекать не будет. Это значит, что емкость C_{12} между обмотками исключается из измерения. Измеренная емкость в этом случае будет равна

$$C_1 = C_{10} + C_{20}. \quad (5)$$

При измерении по второй схеме, показанной на рис. 1,в, потенциал на второй обмотке будет равен потенциалу на корпусе трансформатора и емкость C_{20} между второй обмоткой и корпусом исключается из измерения. Измеренная емкость в этом случае будет равна

$$C_2 = C_{10} + C_{12}. \quad (6)$$

При измерении по третьей схеме, показанной на рис. 1,г, потенциал на первой обмотке будет равен потенциалу на корпусе трансформатора и емкость C_{10} между первой обмоткой и корпусом исключается из измерения. Измеренная емкость в этом случае будет равна

$$C_3 = C_{20} + C_{12}. \quad (7)$$

Итак, имеем три линейных уравнения с тремя неизвестными C_{12} , C_{10} и C_{20} .

Из уравнений (5)–(7) легко определяются неизвестные емкости:

$$C_{10} = \frac{C_1 + C_2 - C_3}{2}; \quad (8)$$

$$C_{20} = \frac{C_1 + C_3 - C_2}{2}; \quad (9)$$

$$C_{12} = \frac{C_2 + C_3 - C_1}{2}. \quad (10)$$

Таким образом, процесс определения частичных емкостей объекта измерения значительно упрощается.

Поставленная цель достигается тем, что в устройство для измерения электрической емкости [4], содержащее источник синусоидального напряжения, эталонный резистор, усилитель, индикатор, два выходных вывода, к которым подключают объект испытания, в котором первый вывод эталонного резистора соединен с первым выводом источника синусоидального напряжения, второй вывод эталонного резистора соединен с первым выходным выводом устройства и входом усилителя, выход которого соединен с входом индикатора, введены два реле с переключающимися контактами, переключатель на три положения, два двухходовых элемента ИЛИ, два усилителя мощности, выходной вывод устройства и источник питания цепей управления, причем замыкающие контакты переключающихся контактов реле соединены с вторым выводом источника синусоидального напряжения, а размыкающие контакты этих реле – с первым выводом источника синусоидального напряжения, подвижный контакт первого реле – с вторым выходным выводом устройства, подвижный контакт второго реле – с третьим выходным выводом устройства, подвижный контакт переключателя на три положения – с выходным выводом источника питания цепей управления, первый неподвижный контакт переключателя – с первым входом первого элемента ИЛИ и первым входом второго элемента ИЛИ, второй неподвижный контакт переключателя – с вторым входом первого элемента ИЛИ, третий неподвижный контакт переключателя – с вторым входом второго элемента ИЛИ, выход первого элемента ИЛИ – с входом первого усилителя мощности, выход которого соединен

с входом втягивающей катушки первого реле, выход второго элемента ИЛИ – с входом второго усилителя мощности, выход которого соединен с входом втягивающей катушки второго реле.

Структурная схема устройства для измерения электрических емкостей изоляции обмоток двухобмоточного трансформатора представлена на рис. 2.

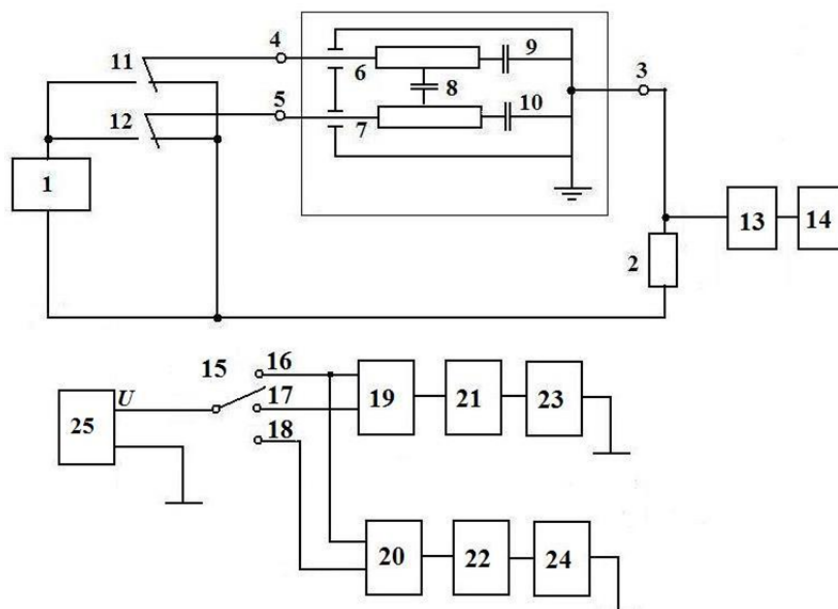


Рис. 2. Структурная схема устройства для измерения электрических емкостей изоляции обмоток двухобмоточного трансформатора

На рис. 2 обозначено: 1 – источник синусоидального испытательного напряжения; 2 – эталонный резистор; 3, 4, 5 – первый, второй и третий выходные выводы устройства; 6, 7 – первая и вторая обмотки испытуемого трансформатора; 8 – емкость C_{12} между первой и второй обмотками трансформатора; 9 – емкость C_{10} первой обмотки трансформатора на корпус; 10 – емкость C_{20} второй обмотки трансформатора на корпус; 11, 12 – силовые переключающие контакты первого и второго реле; 13 – усилитель; 14 – индикатор; 15 – переключатель на три положения; 16, 17, 18 – первый, второй и третий неподвижные контакты переключателя 15 на три положения; 19, 20 – первый и второй двухвходовые элементы ИЛИ; 21, 22 – первый и второй усилители мощности; 23, 24 – катушки первого и второго реле; 25 – источник питания цепей управления.

Устройство работает следующим образом. Когда переключатель 15 находится в первом положении, его подвижный контакт соединен с первым неподвижным контактом 16. При этом на первых входах первого 19 и второго 20 элементов ИЛИ появляется единичный сигнал. На выходах первого 19 и второго 20 элементов ИЛИ также появляются единичные сигналы, которые через усилители мощности 21 и 22 подаются на катушки первого 23 и второго 24 реле. Первое и второе реле срабатывают и замыкают свои замыкающие силовые контакты 11 и 12. При этом собирается схема по рис. 1,б, по которой измеряется емкость $C_1 = C_{10} + C_{20}$. Результат первого измерения считывается с индикатора 14.

Далее переключатель 15 переводят во второе положение, при котором его подвижный контакт соединен со вторым неподвижным контактом 17. При этом сигнал на втором входе первого двухвходового элемента 19 равен единице, а сигналы на обоих входах второго элемента 20 ИЛИ становятся равными нулю. Сигнал на выходе первого двухвходового элемента 19 ИЛИ остается равным единице, а сигнал на выходе второго двухвходового элемента 20 ИЛИ становится равным нулю. Первое реле остается включенным, а второе реле обесточивается, и его замыкающие контакты 12 замыкаются. При этом собирается схема по рис. 1,в, по которой измеряется емкость $C_2 = C_{10} + C_{12}$. Результат второго измерения считывается с индикатора 14.

В третьем положении переключателя 15 его подвижный контакт соединен с третьим неподвижным контактом 18. При этом сигнал на обоих входах первого двухвходового элемента 19 ИЛИ равен нулю, а сигналы на втором входе второго элемента 20 ИЛИ становятся равными единице. Сигнал на выходе первого двухвходового элемента 19 ИЛИ становится равным нулю, а сигнал на выходе второго двухвходового элемента 20 ИЛИ – равным единице. Первое реле выключается, его размыкающие контакты 11 замыкаются, а второе реле включается, и его замыкающие контакты 12 замыкаются. При этом собирается схема $C_3 = C_{20} + C_{12}$. Результат третьего измерения считывается с индикатора 14. После этого по результатам трех измерений значения искомых емкостей определяют по формулам (8)–(10).

Технико-экономический эффект определяется упрощением процесса измерения и определением емкостей за счет исключения при каждом измерении одного конденсатора.

Эквивалентная схема каждой обмотки трансформатора представляет собой параллельный RCL контур (рис. 3).

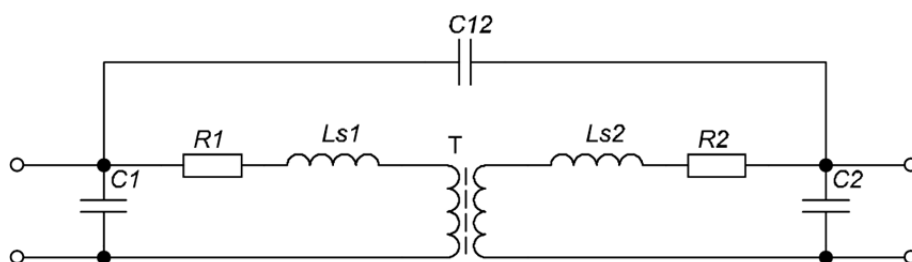


Рис. 3. Эквивалентная схема каждой обмотки трансформатора

Для каждой обмотки существует собственная резонансная частота, определяемая формулой

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}},$$

где L – индуктивность обмотки; C – емкость обмотки.

Определив резонансную частоту обмотки и ее индуктивность, можно рассчитать емкость обмотки. Данный метод называется резонансным. Он является наиболее простым и позволяет получить приемлемые результаты. Однако при использовании данного метода для измерения обмоток импульсных высоковольтных трансформаторов с ферритовым сердечником необходимо учитывать ряд особенностей. Во-первых, ферритовые сердечники обладают нелинейной зависимостью магнитной проницаемости от величины плотности магнитного потока. Для того чтобы индуктивность обмотки не изменялась в процессе измерений, необходимо контролировать величину магнитного потока в обмотке. Во-вторых, в трансформаторе за счет магнитной связи обмоток емкость одной обмотки оказывает значительное влияние на результат измерения емкости другой магнитно связанной обмотки.

Исключить влияние данных факторов можно, если проводить измерения для обмотки отдельно, без сердечника и остальных обмоток. Как правило, обмотки высоковольтных трансформаторов наматываются на отдельных изоляционных каркасах, поэтому разделить обмотки не составляет труда.

В работе исследован импульсный трансформатор для преобразователя с выходной мощностью 1 кВт и с номинальным напряжением 8 кВ. Вторичная обмотка трансформатора содержит 418 витков провода МГТФ-0,07, расположенных в 6,6 слоях. Толщина межслоевой изоляции 0,23 мм. Сердечник: Ferroxcube U100/57/20, феррит 3С90, $L_e = 308$ мм, $A_e = 645$ мм², $\mu_e = 2200$, $A_{l0} = 5500$ нГн/вит.

Для сравнения проведены два измерения АЧХ при постоянной амплитуде напряжения. Первое измерение проведено для обмотки с сердечником, но без первичной обмотки, с учетом особенностей, изложенных выше, второе измерение – для вторичной обмотки отдельно. Результаты АЧХ двух измерений приведены на рис. 4. Дополнительно созданы компьютерные модели в программе ElectricWorkBench 5.12, получены АЧХ.



Рис. 4. Результаты двух измерений АЧХ при постоянной амплитуде напряжения

По резонансным частотам рассчитаны емкости для каждого измерения (табл. 1).

Таблица 1

Расчет емкостей для каждого измерения по резонансным частотам

Образец	Резонансная частота, Гц	Индуктивность, Гн	Емкость, Ф
Без сердечника	387 000	8,09E-03	2,09E-11
С сердечником	86 000	1,66E-01	2,06E-11

По результатам, приведенным на рис. 2, видно, что обе экспериментальные характеристики совпадают с моделью. Это позволяет сделать вывод об адекватности модельного представления и точности результатов измерения. На практике оба способа измерений способствуют получению приемлемых результатов. Измерения обмотки отдельно более простые и не требуют специальных условий проведения эксперимента.

Список литературы

1. Справочник по электроустановкам промышленных предприятий : в 4 т. / под ред. А. С. Дорофеюка, В. И. Круповича. – М. ; Л. : Энергия, 1965. – Т. 3. – С. 139–140.
2. Эпштейн, С. Л. Справочник по измерительным приборам для радиодеталей / С. Л. Эпштейн, А. П. Викулов, В. Н. Москвин ; под ред. Е. А. Гайлиша. – Л. : Энергия, 1980. – С. 10.
3. Основы метрологии и электрические измерения : учеб. для вузов / Б. Я. Авдеев, Е. М. Антонюк, Е. И. Душин и др. ; под ред. Е. М. Душина. – 6-е изд., перераб. и доп. – Л. : Энергоатомиздат, 1987. – 480 с.
4. Евсеев, В. Г. Устройство для определения схемы замещения двухэлементных датчиков / В. Г. Евсеев, Ю. М. Крысин // Датчики и системы. – 2008. – № 6. – С. 28–30.

Астремский Валерий Сергеевич
аспирант,
Пензенский государственный университет
E-mail: directxo@yandex.ru

Astremskiy Valeriy Sergeevich
postgraduate student,
Penza State University

УДК 681.586

Астремский, В. С.

Устройство измерения емкости обмоток трансформатора / В. С. Астремский // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2014. – № 4 (10). – С. 14–19.