

УДК 621.314.228

Методика определения емкостных и индуктивных параметров силовых высоковольтных трансформаторов повышенной частоты

А.В. Гусенков, Т.Е. Шадриков, А.А. Дьячков, А.А. Симакова
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: sam@vetf.ispu.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Согласно литературным источникам, существуют методики расчета как самих трансформаторов, так и элементов их схемы замещения. Однако практически отсутствуют сведения о расчете параметров схемы замещения для обмоток катушечной конструкции. Значительный прогресс в области силовой электроники позволяет создавать распределительные сети (электропередачи) специального назначения нового типа с использованием в их составе полупроводниковых преобразователей напряжения. Одной из отличительных особенностей таких сетей (электропередач) является использование высоковольтного напряжения трапецидальной формы повышенной частоты. Для получения высокого напряжения необходимо применять силовые высоковольтные трансформаторы повышенной частоты. Для моделирования процессов, протекающих в обмотках силовых трансформаторов повышенной частоты (10–20 кГц), и исследования различных режимов электропередач с их применением необходимо знать параметры схемы замещения трансформатора. Такие исследования необходимы для разработки оптимальных конструкций и обеспечения рациональных режимов работы локальных высоковольтных кабельных электрических сетей повышенной частоты систем электроснабжения различных потребителей.

Материалы и методы: Обоснование методики расчета емкостных и индуктивных параметров силовых высоковольтных трансформаторов повышенной частоты получено аналитическим путем и с использованием программного обеспечения на ЭВМ. Используются экспериментальные данные, полученные с помощью цифровых RLC-измерителей, а также данные, опубликованные в различных литературных источниках.

Результаты: Разработана методика определения емкостных и индуктивных параметров силовых высоковольтных трансформаторов повышенной частоты с учетом варианта конструирования высоковольтной и низковольтной обмоток трансформатора, наличия секционирования и слоевого исполнения обмоток. Получены экспериментальные значения индуктивных и емкостных параметров опытного образца силового высоковольтного трансформатора повышенной частоты. Достоверность предложенной методики проверена путем сопоставления результатов расчета с измеренными экспериментальными данными.

Выводы: Предложенная методика позволяет определить емкостные и индуктивные параметры силовых высоковольтных трансформаторов повышенной частоты.

Ключевые слова: силовой трансформатор, повышенная частота, параметры трансформатора, схема замещения, силовая электроника, индуктивность рассеивания.

Methods of capacitance and inductance parameters of increased frequency high voltage power transformers

A.V. Gusenkov, T.E. Shadrikov, A.A. Dyachkov, A.A. Simakova
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: sam@vetf.ispu.ru

Abstract

Background: Relevant literature describes a number of calculation techniques for both transformers and their equivalent circuit elements. But there is almost no information about calculation of equivalent circuit parameters for coil windings. The significant progress in power electronics allows creating a new type of special purpose distribution (power transmission) networks containing voltage semiconductor converters in their structure. One of the distinguishing features of such (power transmission) networks is using increased frequency trapezoidal high voltage. To obtain such high voltage, it is necessary to apply increased frequency high voltage power transformers. To simulate the processes occurring in the windings of the increased frequency power transformers (10–20 kHz) and to study different operation modes of power transmission, it is important to know the parameters of the transformer equivalent circuit. Such research is required to develop the optimal structures and ensure rational modes of local high-voltage increased frequency cable networks of electrical systems supplying electricity to various consumers.

Materials and methods: The techniques of calculating the capacitance and inductance parameters of increased frequency high voltage power transformers were obtained analytically and by computer software tools. The study also employed experimental data obtained by digital RLC-gauges and the data presented in various publications.

Results: A method has been developed to determine capacitance and inductance parameters of increased frequency high voltage power transformers with an account of design variant of the high and low voltage transformer windings, presence of partitioning and winding layering. Experimental values of inductance and capacitance parameters of the increased frequency power high voltage transformer prototype have been obtained. The validity of the proposed method has been checked by comparing the calculation results with the experimental data.

Conclusions: The proposed method allows determining the capacitance and inductance parameters of increased frequency high voltage power transformers.

Key words: power transformer, increased frequency, transformer parameters, equivalent circuit, power electronics, transformer-leakage inductance.

DOI: 10.17588/2072-2672.2016.1.027-033

Введение. Согласно литературным источникам, существуют методики расчета как самих трансформаторов, так и элементов их схемы замещения. Например, в [1] приводится методика проектирования и расчета высоковольтных импульсных трансформаторов, предназначенных для получения импульсов высокого напряжения с требуемыми параметрами, имеющих сравнительно небольшую мощность и отличающихся применением обмоток слоевой конструкции. Однако практически отсутствуют сведения о расчете параметров схемы замещения для обмоток катушечной конструкции. В [2] производится расчет параметров трансформаторов преимущественно промышленной частоты, но при этом отсутствует в явном виде методика расчета параметров схемы замещения. Справочные данные типовых силовых трансформаторов промышленной частоты, приведенные в [3], почти не содержат информации о параметрах схемы замещения трансформаторов и методах их непосредственного расчета. Несмотря на глубокую разработку методов расчета электрической емкости в разнообразных задачах электротехники в [4], они оказываются практически не пригодными для определения емкостных параметров схемы замещения силовых трансформаторов повышенной частоты, так как не учитывают распределение потенциала по поверхности электродов, образующих соответствующие емкости (что имеет место в конструкции обмоток трансформаторов). Знание параметров схемы замещения силовых трансформаторов повышенной частоты (10–20 кГц) необходимо для исследования процессов, протекающих в обмотках таких трансформаторов [5] и в электропередачах с их применением при различных режимах работы [6]. Перечисленные выше методы определения индуктивных и емкостных параметров лишь частично применимы при расчете высоковольтных трансформаторов повышенной частоты, предназначенных для использования в электропередачах и электрических сетях высокого напряжения. Произведенные вычисления по названным выше методикам [1–4], а также по наиболее близкой методике расчета, изложенной в [7], показали малую сходимость расчетных и экспериментальных результатов существующих методов расчета параметров схем замещения импульсных трансформаторов и трансформаторов промышленной частоты с результатами опытного определения параметров трансформаторов повышенной частоты. Требуется раз-

работка методики, пригодной для расчета силовых высоковольтных трансформаторов повышенной частоты.

Конструкция силовых трансформаторов повышенной частоты. Предварительный опыт изготовления и испытания силовых высоковольтных трансформаторов повышенной частоты показал, что большое практическое значение имеет знание емкостных и индуктивных параметров высоковольтной обмотки (емкость относительно земли, емкость между слоями, емкость между секциями, индуктивности рассеяния отдельных секций, а также всей обмотки и др.). Одновременно было установлено, что для таких трансформаторов предпочтительной является конструкция с применением слоевой намотки для первичной обмотки и катушечной для вторичной (высоковольтной). При этом также было получено подтверждение известных представлений о необходимости максимального уменьшения величины емкостных и индуктивных параметров высоковольтной обмотки силовых высоковольтных трансформаторов повышенной частоты. На рис. 1 представлена схема конструкции силового высоковольтного трансформатора повышенной частоты экспериментальной кабельной электропередачи повышенной частоты мощностью 3 кВт [6] (номинальное напряжение первичной обмотки $U_1 = 250$ В, вторичной обмотки $U_2 = 1250$ В, рабочая частота $f = 13$ кГц). Была использована методика расчета [6].

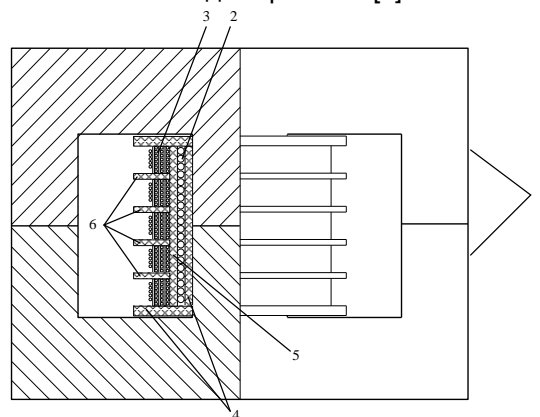


Рис. 1. Конструкция высоковольтного силового трансформатора: 1 – Ш-образный ферритовый магнитопровод 2хЕ50; 2 – слоевая обмотка низкого напряжения; 3 – катушечная обмотка высокого напряжения, состоящая из 5 катушек (секций); 4 – стенки каркаса; 5 – изоляция между обмотками высокого и низкого напряжения; 6 – изоляционные прокладки между секциями высоковольтной обмотки

Трансформатор повышенной частоты представляет собой двухобмоточный транс-

форматор, который состоит из Ш-образного ферритового сердечника 2хЕ50 и изоляционно-каркаса с обмотками. Первичная обмотка расположена ближе к стержню магнитопровода и намотана в один слой. Поверх нее расположена вторичная (высоковольтная) катушечная обмотка. Для уменьшения ее емкостей индуктивностей рассеяния она разделена на пять секций (катушек), которые соединены между собой последовательно. Картонный каркас с обмотками пропитан парафином в целях повышения электрической прочности. На рис. 2 представлен разрез обмоток данного трансформатора.

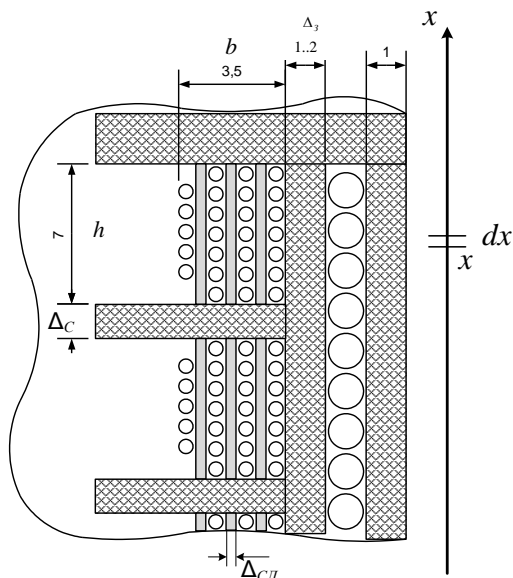


Рис. 2. Разрез обмоток силового трансформатора повышенной частоты

Первичная обмотка имеет 26 витков из медного эмалированного провода диаметром 1,5 мм. Вторичная обмотка выполнена медным эмалированным проводом диаметром 0,7 мм, каждая из пяти секций (катушек) имеет по 26 витков (полное число витков вторичной обмотки – 130). Секции вплотную прилегают друг к другу и разделены лишь картонными барьерами толщиной около 0,5 мм. В пределах каждой секции провод наматывается послойно (всего четыре слоя), а укладка провода в каждом последующем слое выполняется во встречном направлении по отношению к предыдущему слою.

Описание методики расчета емкостных и индуктивных параметров схемы замещения силового трансформатора повышенной частоты. На рис. 3 представлена электрическая схема обмоток трансформатора с указанием электрических емкостей, которые необходимо определять расчетным способом (электрическая схема замещения представлена межкатушечными, слоевыми емкостями и емкостями на землю, первичная и вторичная обмотки трансформатора заземлены на конце). Для этого целесообразно воспользоваться мето-

логией определения емкости на основе оценки энергии электрического поля в изоляции, которая позволила получить расчетные соотношения для определения емкостных параметров обмоток импульсных трансформаторов слоевой конструкции [1].

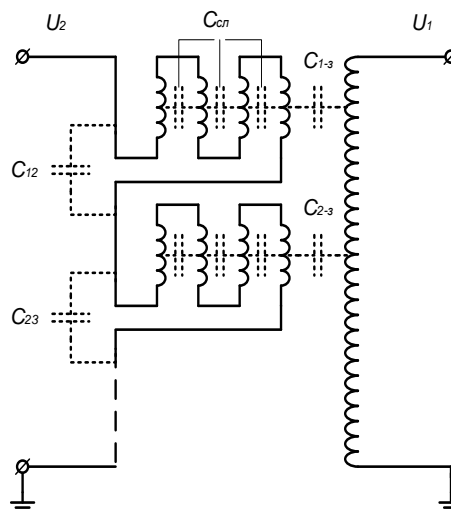


Рис. 3. Схема распределения емкостей в обмотке трансформатора повышенной частоты: U_2 – вторичная (высоковольтная) обмотка трансформатора; U_1 – напряжение первичной (низковольтной) обмотки трансформатора; C_{12}, C_{23}, C_{ij} – межкатушечная емкость вторичной обмотки; $C_{сл}$ – слоевая емкость в катушке вторичной обмотки; $C_{1-3}, C_{2-3}, C_{i-3}$ – емкость катушки вторичной обмотки на землю

Для заданной конструкции трансформатора (рис. 2) при определении емкости верхней по схеме секции относительно обмотки низкого напряжения (C_{1-3}), используя формулу емкости плоского конденсатора, можно записать следующее выражение определения элементарной емкости:

$$dC_{1-3x} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0\rho}{\Delta_3} dx, \quad (1)$$

где ε_0 и ε – абсолютная и относительная диэлектрическая проницаемости изоляции; ρ – средняя длина витка; $\Delta_3 = 1,5$ мм – толщина изоляции между низковольтной и высоковольтной обмотками.

Энергия электрического поля в элементарной емкости (1) может быть найдена следующим образом:

$$dW_{1-3} = \frac{dC_{1-3}U_x^2}{2} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0\rho U_x^2}{2\Delta_3}, \quad (2)$$

где U_x – величина напряжения на этой емкости, т.е. разность потенциалов между высоковольтной и низковольтной обмотками в точке с координатой x (рис. 2) в предположении, что низковольтная обмотка имеет нулевой потенциал (заземлена).

Анализ распределения напряжений по секциям и слоям секций (рис. 2) позволяет сделать вывод, что изменение напряжения вдоль изоляционного зазора между обмотками при

изменении x от 0 до h будет описываться следующим соотношением:

$$U_x = \frac{4U_2}{n_c} + \frac{xU_2}{hn_cm} = \frac{U_2}{n_c} \left(4 + \frac{x}{hm} \right), \quad (3)$$

где $n_c = 5$ – число секций высоковольтной обмотки; $m = 4$ – число слоев обмотки в одной секции; h – высота секции в сечении (рис. 3).

Энергия электрического поля в рассматриваемом зазоре определяется интегрированием выражения (2) с учетом (3):

$$\begin{aligned} W_{1-3} &= \int_{x=0}^h dW_{1-3} = \int_{x=0}^h \frac{\varepsilon\varepsilon_0 p U_x^2}{2\Delta_3} dx = \\ &= \frac{\varepsilon\varepsilon_0 p U_2^2}{2\Delta_3 n_c^2} \int_{x=0}^h \left(4 + \frac{x}{hm} \right)^2 dx. \end{aligned} \quad (4)$$

Эта величина может быть найдена как энергия, запасенная в конденсаторе C_{1-3} (рис. 3) при воздействии максимального напряжения этой секции:

$$W_{1-3} = \frac{C_{1-3} U_2^2}{2}. \quad (5)$$

Если приравнять левые части уравнений (4) и (5), а также повторить приведенные выкладки для всех секций высоковольтной обмотки, то получается выражение для определения емкости каждой секции относительно низковольтной обмотки:

$$\begin{aligned} C_{1-3} = \dots = C_{5-3} &= \frac{\varepsilon_0 \varepsilon p}{2\Delta_3 n_c^2} \int_0^h \left(4 + \frac{x}{hm} \right) dx = \\ &= \frac{\varepsilon_0 \varepsilon p h}{2\Delta_3 n_c^2} \left(16 + \frac{4}{m} + \frac{1}{3m^2} \right). \end{aligned} \quad (6)$$

Другим элементом обмотки, где запасается энергия электрического поля, является межслоевая изоляция каждой секции. В этом случае для одной секции с учетом конструкции и электрической схемы обмотки (рис. 2, рис. 3) выражения (1)–(3) для одного слоя секции приобретают следующий вид:

$$\begin{aligned} dC_{сл} &= \frac{\varepsilon_0 \varepsilon p}{\Delta_{сл}} dx; \\ dW_{сл} &= \frac{dC_{сл} U_x^2}{2} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 p U_x^2}{2\Delta_{сл}} dx; \\ U_x &= \frac{2xU_2}{hn_cm}, \end{aligned} \quad (7)$$

где $\Delta_{сл} = 0,1$ мм – толщина изоляции между слоями.

По аналогии с выражением (4) может быть найдена энергия электрического поля, сосредоточенного в слоевой изоляции, с учетом числа межслоевых изоляционных промежутков одной секции, к которой следует приравнять энергию в эквивалентной емкости слоевой изоляции:

$$\begin{aligned} W_{сл} &= (m-1) \int_{x=0}^h dW_{сл} = \\ &= \frac{2(m-1)\varepsilon\varepsilon_0 p h U_2^2}{\Delta_{сл} n_c^2 m^2} = \frac{C_{сл} U_2^2}{2}. \end{aligned} \quad (8)$$

Из (8) нетрудно получить выражение для определения емкости межслоевой изоляции:

$$C_{сл} = \frac{4\varepsilon_0 \varepsilon_r p (m-1)}{3\Delta_{сл} n_c^2 m^2}. \quad (9)$$

Как показывает анализ формулы (8) и (9), значение этой емкости оказывается приведенным к величине наибольшего напряжения секции. Рассуждения и выкладки, аналогичные приведенным выше, позволяют сделать вывод, что слоевая емкость каждой из всех остальных секций высоковольтной обмотки будет иметь одинаковую величину, определяемую выражением (9). Благодаря использованию рассмотренного выше порядка определения емкостных параметров было получено выражение для определения величины емкости между соседними секциями:

$$C_{12} = C_{23} = C_{34} = C_{45} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon p b}{\Delta_c} \left(1 - \frac{1}{m} \right)^2, \quad (10)$$

где $b = 3,5$ мм – ширина секции в сечении (рис. 2).

Сопоставление методики расчета с экспериментальными данными. Очевидно, что достоверность полученных выше формул должна быть проверена экспериментально. Для этого были выполнены измерения емкостей трансформатора (рис. 1) с помощью цифрового RLC-измерителя. Поскольку при изготовлении трансформатора для повышения электрической прочности его изоляции производилась пропитка обмоток парафином, эти измерения были выполнены до и после пропитки. Результаты измерений приведены табл. 1.

Эти результаты качественно согласуются между собой. Действительно, после пропитки емкостные параметры увеличились на 15–20 %, что обусловлено замещением воздушных включений диэлектриком (парафином) с более высокой относительной диэлектрической проницаемостью. Следует отметить заметное влияние частоты на величину емкостей как до пропитки, так и после, что свидетельствует о наличии релаксационной поляризации в изоляционном материале. Увеличение частоты, как известно, приводит к постепенному ослаблению поляризации такого вида, что вызывает уменьшение относительной диэлектрической проницаемости до некоторого установившегося значения и соответствующего изменения электрической емкости.

Зависимость изменения емкости катушек вторичной обмотки трансформатора на землю после пропитки в относительных единицах в зависимости от рабочей частоты представлена на рис. 4.

Таблица 1. Емкость обмотки силового трансформатора повышенной частоты до пропитки/после пропитки

Измеренный параметр	Частота f, Гц			
	100	1000	10000	100000
Емкость C, пФ				
C ₁₂	21,5/ 25	19,8/ 23,4	19,16/ 22,6	18,68/ 21,75
C ₂₃	22,9/ 28,4	21,2/ 25,4	21,02/ 25,3	20,28/ 24,4
C ₃₄	21,7/ 24,5	19,3/ 22,7	18,65/ 21,9	18,42/ 21,4
C ₄₅	20,6/ 25,4	18,8/ 23,1	17,64/ 22,35	17,44/ 21,78
C ₁₃	15,7/ 18,1	14,1/ 17,1	13,56/ 16,3	13,31/ 16,25
C ₅₃	15,4/ 19	13,8/ 17,4	13,27/ 16,7	12,94/ 16,25
C ₂₄	18,6/ 21,9	16,5/ 20	15,83/ 19,1	15,87/ 18,68
C ₁₄	15,5/ 18,3	13,9/ 16,5	13,47/ 15,68	13,1/ 15,4
C ₂₅	14,3/ 18,6	13,1/ 16,7	12,59/ 16,03	12,69/ 15,1
C ₁₋₃	24,3/ 32,1	22,2/ 28,8	21,58/ 27,7	21,13/ 27,3
C ₂₋₃	28,5/ 38,4	26,5/ 33,8	25,57/ 33,6	25,01/ 32,6
C ₃₋₃	24,5/ 32,4	22,7/ 27,3	22,06/ 27,6	21,64/ 26,8
C ₄₋₃	25,7/ 34	23,7/ 30,5	22,93/ 29,7	22,5/ 28,7
C ₅₋₃	20,9/ 25,5	19,1/ 25,3	18,44/ 24,6	18,15/ 23,2
C _{Σ-3}	64,8/ 90,6	59,7/ 82,1	57,68/ 78,31	56,66/ 76,69

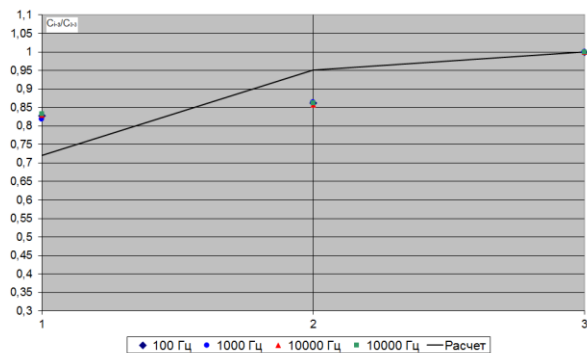


Рис. 4. Сравнение результатов расчета и эксперимента по определению емкостных параметров силового трансформатора: C₁₋₃ = C₅₋₃, C₂₋₃ = C₄₋₃, C₃₋₃, – емкость обмотки соответствующей секции относительно земли. Ось абсцисс: 1(5), 2(4) 3 – номер секции высоковольтной обмотки силового трансформатора. Легенда: точки – эксперимент (результаты измерения при соответствующей частоте); линия – расчет

С учетом влияния на результаты измерения индуктивности получено (рис. 4) удовлетворительное согласование результатов расчета и эксперимента.

Результаты измерения индуктивных параметров свидетельствуют, как и следовало ожидать, об отсутствии заметного влияния пропитки на величину этих параметров (табл. 2).

Таблица 2. Индуктивность обмотки силового трансформатора повышенной частоты до пропитки/после пропитки

Измеренный параметр	Частота f, Гц		
	1000	10000	100000
Индуктивность L, мкГн			
L _{2-к3}	331,5/ 328	281,5/ 279	241,8/ 239
L _{1 к3}	22,5/ 22,5	22,1/ 22,04	21,35/ 21,32

Примечание: К3 – при измерении индуктивности одной из обмоток вторая обмотка закорачивается.

Следует также иметь в виду, что произвести измерения каждого из емкостных параметров, определяемых формулами, полученными выше, невозможно. Например, при измерении емкости секции высоковольтной обмотки относительно первичной обмотки и емкости между соседними секциями возникает ситуация, которая может быть представлена рис. 5, 6 соответственно.

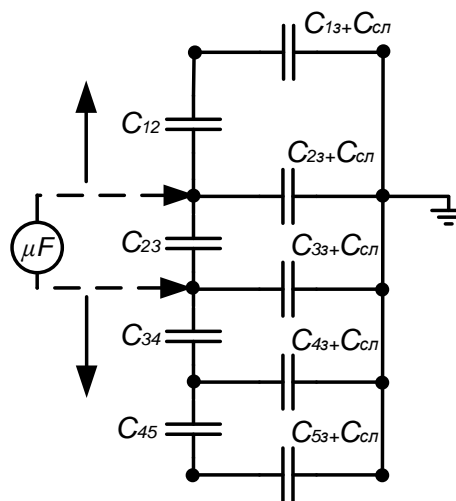


Рис. 5. Схема замещения при измерении емкости между соседними секциями высоковольтной обмотки

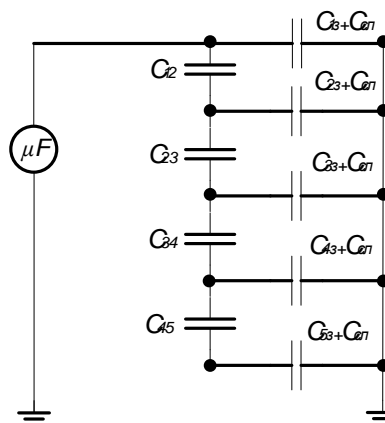


Рис. 6. Схема замещения при измерении емкости одной секции высоковольтной обмотки относительно первичной обмотки

Для определения индуктивности рассеивания высоковольтной обмотки трансформато-

ра повышенной частоты предложен вариант измерения по схеме на рис. 7.

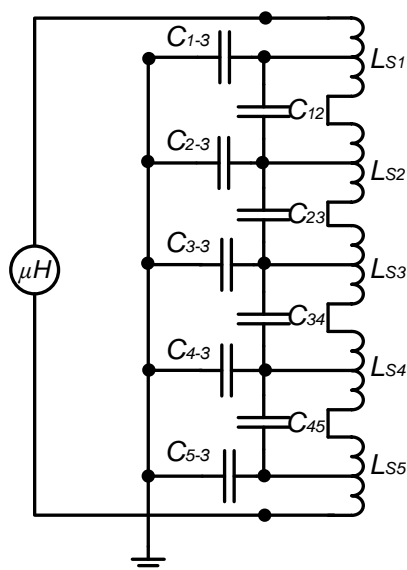


Рис. 7. Схема замещения при измерении индуктивности рассеивания высоковольтной обмотки

Расчет индуктивности рассеивания высоковольтной обмотки трансформатора был произведен по формуле

$$L_{2S} = \frac{\mu_0 W_2^2 P}{h} \left[\Delta_3 + \frac{1}{m^2} \sum_{k=1}^{m-1} (\Delta_{cl}(m-k)^2) + \frac{d_1}{3} + \frac{1}{3} \sum_{k=0}^{m-1} \left[d_2 \left(3 \cdot \left(1 - \frac{k}{m} \right) \left(1 - \frac{k+1}{m} \right) + \frac{1}{m^2} \right) \right] \right]. \quad (11)$$

Результаты экспериментальных и расчетных значений индуктивности рассеивания высоковольтной обмотки трансформатора повышенной частоты представлены на рис. 8.

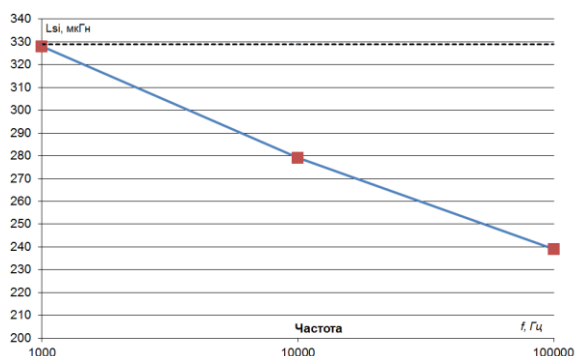


Рис. 8. Экспериментально измеренные и расчетные значения индуктивности рассеивания высоковольтной обмотки: пунктирная линия – расчетное значение индуктивности рассеивания; сплошная линия – экспериментальные данные

Анализ полученных результатов (рис. 8) показывает, что результаты расчета индуктивности рассеивания по формуле (11) полностью согласуются с экспериментальными значениями лишь при частоте в 1000 Гц. При увеличении частоты питающего напряжения происходит заметное снижение индуктивности рассеивания обмотки трансформатора, что можно объяснить

влиянием емкостных параметров высоковольтной обмотки в соответствии со схемой замещения на рис. 7.

Заключение

Применение энергетического подхода для расчета емкостных и индуктивных параметров силовых высоковольтных трансформаторов повышенной частоты является эффективным методом достоверной оценки этих показателей.

В случае использования энергетической методики определения параметров схемы замещения трансформатора необходимо учитывать особенности конструктивного исполнения высоковольтной обмотки силового трансформатора.

Методика определения емкостных и индуктивных параметров является основой для определения параметров традиционной Т-образной схемы замещения трансформаторов.

Измерение индуктивности рассеивания обмотки трансформатора целесообразно проводить на частотах не более 1000 Гц, чтобы свести к минимуму влияние емкостных элементов обмотки на результаты измерений.

Целесообразно дальнейшее развитие методики расчета высоковольтных силовых трансформаторов повышенной частоты с использованием предложенной методики определения емкостных и индуктивных параметров в целях создания оптимальной конструкции таких трансформаторов.

Список литературы

1. **Вдовин С.С.** Проектирование импульсных трансформаторов. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1991. – 208 с.
2. **Тихомиров П.М.** Расчет трансформаторов: учеб. пособие для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1976. – 544 с.
3. **Лизунова С.Д., Лоханина А.К.** Силовые трансформаторы. Справочная книга. – М.: Энергоиздат, 2004. – 616 с.
4. **Иоссель Ю.Я., Кочанов Э.С., Струнский М.Г.** Расчет электрической емкости. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1981. – 288 с.
5. **Забарило Д.А.** Особенности расчета силового трансформатора повышенной частоты // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. – 2013. – Вип. 3 (45). – С. 29–35.
6. **Технико-экономические** показатели силовых трансформаторов высокого напряжения локальных электроэнергетических систем переменного тока повышенной частоты / Т.Е. Шадриков, А.М. Соколов, А.В. Гусенков, В.Д. Лебедев // Энергетик. – 2015. – № 2. – С. 11–14.
7. **Мелешин В.И.** Транзисторная преобразовательная техника. – М.: Техносфера, 2005. – 632 с.

References

1. Vdovin, S.S. *Proektirovanie impul'snykh transformatorov* [Impulse transformer design]. Leningrad, Energoatomizdat. Leningradskoe otdelenie, 1991. 208 p.
2. Tikhomirov, P.M. *Raschet transformatorov* [Transformer calculation: a university study guide]. Moscow, Energiya, 1976. 544 p.

3. Lizunova, S.D., Lokhanina, A.K. *Silovye transformatory. Spravochnaya kniga* [Power transformers. A reference book]. Moscow, Energoizdat, 2004. 616 p.

4. Iosel', Yu.Ya., Kochanov, E.S., Strunskiy, M.G. *Raschet elektricheskoy emkosti* [Electrical capacitance calculation]. Leningrad, Energoizdat. Leningradskoe otdelenie, 1981. 288 p.

5. Zabarilo, D.A. Osobennosti rascheta silovogo transformatora povyshennoy chastoty [Aspects of increased frequency power transformer calculation]. *Visnik Dnipropetrovs'kogo natsional'nogo universitetu zaliznichnogo transport*, 2013, issue 3(45), pp. 29–35.

6. Shadrikov, T.E., Sokolov, A.M., Gusenkov, A.V., Lebedev, V.D. Tekhniko-ekonomicheskie pokazateli silovykh transformatorov vysokogo napryazheniya lokal'nykh elektroenergeticheskikh sistem peremennogo toka povyshennoy chastoty [Technical and economical parameters of high voltage power transformer as a part of increased frequency local power energy supply system]. *Energetik*, 2015, no. 2, pp. 11–14.

7. Meleshin, V.I. *Tranzistornaya preobrazovatel'naya tekhnika* [Transistor converter equipment]. Moscow, Tekhnosfera, 2005. 632 p.

Гусенков Алексей Васильевич,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, зав. кафедрой электрических станций, подстанций и диагностики электрооборудования,
телефон (4932) 38-57-17,
e-mail: avgus@ispu.ru

Шадриков Тимофей Евгеньевич,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
аспирант кафедры высоковольтной электроэнергетики, электротехники и электрофизики,
телефон (4932) 26-97-23,
e-mail: pr3d37@yandex.ru

Дьячков Андрей Анатольевич,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
студент кафедры высоковольтной электроэнергетики, электротехники и электрофизики,
e-mail: diachkov-andrei@ya.ru

Симакова Анна Алексеевна,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
студентка кафедры электромеханики,
телефон (4932) 26-97-23.