

Резонансные перенапряжения в обмотках трансформаторов. Ч. 2. Определение резонансных частот обмоток¹

ЛАРИН В.С., ВОЛКОВ А.Ю.

При анализе резонансных перенапряжений в обмотках трансформаторов определение резонансных частот этих обмоток является одним из ключевых вопросов. Рассмотрены подходы к оценке резонансных частот по аналитическим формулам с помощью математического моделирования, а также экспериментального определения путем измерений частотных характеристик обмоток. Рассмотрены вопросы применения частотного анализа реакции обмоток к определению резонансных частот и выделению в частотном спектре собственных частот колебаний обмотки.

Ключевые слова: трансформаторы, обмотки, резонансные перенапряжения, колебания обмоток, частотный анализ

Условия развития и особенности резонансных перенапряжений в обмотках силовых трансформаторов, а также возможные мероприятия по защите от них были рассмотрены в [1]. Было отмечено, что в случае совпадения частот колебаний напряжения в сети и резонансных частот обмоток трансформатора возможно развитие резонансных перенапряжений в обмотках, которые могут стать причиной повреждения их продольной изоляции.

В общем случае для оценки возможности развития резонансных напряжений в обмотках трансформаторов и степени их опасности для внутренней изоляции необходимо:

- 1) определить доминирующие частоты возможных колебаний напряжения в сети;
- 2) определить резонансные частоты обмоток трансформаторов;
- 3) оценить напряжения, воздействующие на элементы изоляции обмоток при резонансных перенапряжениях;
- 4) оценить электрическую прочность изоляции обмоток при воздействии колебательных напряжений, вызванных резонансными перенапряжениями.

В статье рассмотрен один из ключевых вопросов — определение резонансных частот обмоток трансформаторов.

В общем случае в частотной характеристике отдельной обмотки относительно входных зажимов трансформатора содержится немало резонансных частот, которые по своей природе можно разделить на частоты, соответствующие [2]:

электромагнитному взаимодействию между обмотками (как правило, единицы — десятки кГц);

собственными частотам электромагнитных колебаний (далее — колебаний) рассматриваемой обмотки (как правило, десятки — сотни кГц);

отводам и соединительным проводам (как правило, единицы МГц).

Резонансные частоты, соответствующие электрическому взаимодействию между обмотками, следует учитывать при рассмотрении перенапряжений, наводимых на вторичных обмотках питаемой фазы или обмотках других фаз трансформатора. Некоторые вопросы, связанные с наведенными перенапряжениями, в том числе резонансного характера, и с определением соответствующих частот, рассмотрены в [3].

В статье, как и в [1], основной акцент сделан на рассмотрении резонансных перенапряжений, возникающих в обмотках трансформаторов, непосредственно подключенных к электрической сети. При рассмотрении этого типа перенапряжений наибольший интерес представляют резонансные частоты, соответствующие собственным частотам колебаний обмоток, на которых наиболее отчетливо проявляются процессы внутреннего резонанса в этих обмотках и развиваются наибольшие напряжения на главной и продольной изоляции питаемой обмотки трансформатора.

Собственные частоты колебаний обмоток определяются конструктивными параметрами трансформатора, в частности типом обмоток, их электрической длиной и расположением относительно магнитопровода и других обмоток.

Значения собственных частот колебаний обмоток с разной степенью точности могут быть получены аналитически, с помощью математического моделирования и экспериментально.

Теоретическая оценка собственных частот обмоток. Определение собственных частот колебаний обмоток часто является одним из основных этапов расчета импульсных переходных процессов и продольной изоляции обмоток трансформаторов. К настоящему времени имеется большое число публикаций, в которых рассмотрены вопросы теорети-

¹ Часть 1 — см. «Электричество», 2015, № 11.

ческого определения собственных частот, например [4, 5]. Однако из-за наличия в трансформаторе сложного взаимного магнитного и электрического влияния между отдельными элементами одной обмотки и соседних обмоток приводимые в литературе выражения для собственных частот, как правило, основаны на ряде серьезных допущений, потому их применение возможно лишь для приближенной оценки и носит скорее качественный характер.

Так, в случае однородной обмотки с заземленной нейтралью, если пренебречь взаимным магнитным влиянием отдельных элементов этой обмотки и влиянием соседних обмоток, можно получить следующее выражение для определения собственной частоты с номером k (k -й гармоники) [4]:

$$f_k = \frac{v_k}{2\rho \sqrt{LC \frac{\epsilon}{\epsilon_0} 1 + \frac{K}{C} v_k^2 \frac{\delta}{\delta_0}}} = \frac{k}{2 \sqrt{LC \frac{\epsilon}{\epsilon_0} 1 + \frac{K}{C} (kp)^2 \frac{\delta}{\delta_0}}}, \quad (1)$$

где $v_k = kp$ – пространственная частота k -й гармоники; L – индуктивность обмотки; C и K – емкость на землю и продольная емкость обмотки.

Поскольку собственная частота f_k и скорость распространения волны в обмотке V_k связаны соотношением

$$f_k = kV_k / 2l, \quad (2)$$

где l – электрическая длина обмотки, из (1) можно получить

$$V_k = \frac{l}{\sqrt{LC \frac{\epsilon}{\epsilon_0} 1 + \frac{K}{C} (kp)^2 \frac{\delta}{\delta_0}}}. \quad (3)$$

Из (1) следует, что для обмоток с низкой продольной емкостью первые собственные частоты определяются преимущественно емкостью на землю и оказываются близки к частотам колебаний заземленной на конце линии, имеющей такую же электрическую длину.

Из (3) следует, в случае обмотки с малой продольной емкостью скорость распространения волны для первой гармоники

$$V_1 \gg \frac{l}{\sqrt{LC}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_C}},$$

где c – скорость света; ϵ_C – эквивалентная диэлектрическая проницаемость среды, определяющая емкость обмотки на землю.

Кроме того, из (3) следует, что с увеличением номера гармоники скорость распространения волны в обмотке уменьшается.

Также необходимо отметить, что по (2) можно приближенно оценить собственную частоту при условии, что известны оценочное значение скорости распространения волны по обмотке и электриче-

ская длина обмотки, что нередко бывает на практике. Например, в масляных трансформаторах первой собственной частоте, как правило, соответствует скорость распространения около 140–180 м/мкс, в сухих трансформаторах с «открытыми» обмотками 240–300 м/мкс.

Оценка собственных частот обмоток с помощью математического моделирования. Для более точного определения собственных частот колебаний обмоток могут быть использованы высокочастотные модели обмоток, основанные на схемах замещения с распределенными или сосредоточенными параметрами и применяемые в программах расчета импульсных переходных процессов в обмотках трансформаторов (например, в программе ТТ [6]). Необходимо отметить, что при разработке таких программ, как правило, во главу угла ставится задача вычисления максимальных воздействий на продольной изоляции, а не прецизионная точность определения собственных частот обмоток и воспроизведение затухания напряжений в обмотках. Таким образом, математическое моделирование с использованием таких программ может быть использовано, главным образом, для приближенной оценки возможных значений собственных частот обмоток, что может быть очень удобно, например, на стадии проектирования, когда трансформатор еще не изготовлен.

Экспериментальное определение собственных частот обмоток. При питании обмотки трансформатора переменным напряжением с частотой, равной одной из ее резонансных частот, внутри нее развиваются резонансные процессы, сопровождающиеся сравнительно большими колебательными напряжениями и токами, замыкающимися преимущественно по индуктивно-емкостным контурам внутри обмотки. Протекание колебательных токов сопровождается потерями энергии внутри обмоток, а значит, в режиме резонанса от источника потребляется наибольшая активная мощность. При изменении в широком диапазоне частоты питающего напряжения по мере приближения к одной из резонансных частот потери энергии в трансформаторе будут увеличиваться. Таким образом, по локальному максимуму потребляемой активной мощности можно судить о достижении одной из резонансных частот трансформатора.

Задача определения максимума потребляемой мощности в некотором диапазоне частот может быть сведена к задаче определения максимума активной составляющей полной входной проводимости питаемой обмотки трансформатора [7].

Для решения этой задачи на практике достаточно удобным является использование измерительных систем для частотного анализа реакции (ЧАР)

обмоток; (в зарубежной терминологии – Frequency Response Analysis – FRA). Принцип действия таких систем основан на определении частотных характеристик обмоток трансформаторов путем подачи сигнала на один из выводов трансформатора и регистрации входного напряжения \bar{U}_1 от источника и выходного напряжения \bar{U}_2 , наводимого на некотором выводе трансформатора [2]. Стандартным результатом работы такой системы является передаточная функция, представляемая соответствующим модулем $A = |\bar{U}_2 / \bar{U}_1|$ (обычно выражаемым в дБ) и фазовым углом $j = \Phi(\bar{U}_2, \bar{U}_1)$, которые определяются в широком диапазоне частот (от десятков Гц до единиц МГц).

Для иллюстрации далее приведены результаты измерений частотной характеристики и передаточных функций модели непрерывной катушечной обмотки. Обмотка содержит 52 катушки по 10 витков в каждой и имеет средний диаметр около 1050 мм и высоту около 1100 мм (рис. 1). Для измерения в обмотке имеются промежуточные выводы на наружных переходах после каждой пары катушек. Результаты измерений приведены на рис. 2, где показаны передаточные функции напряжений на переходах 14-15, 26-27 и 38-39, соответствующие примерно 1/4, 2/4 и 3/4 электрической длины обмотки.

Необходимо отметить, что частотная характеристика модели обмотки в рассматриваемом примере определена для отдельно взятой обмотки, не имеющей соединительных отводов и высоковольтных вводов. Также необходимо отметить, что рассматриваемая обмотка непрерывного типа имеет сравнительно малую продольную емкость. По этим причинам полученная частотная характеристика содержит явно выраженные резонансные пики, со-

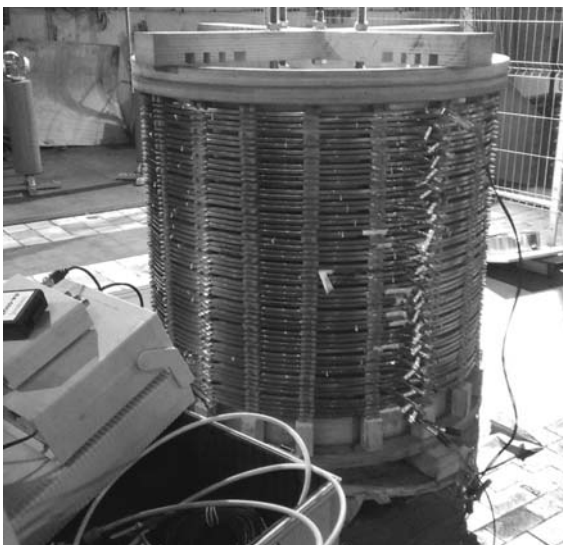


Рис. 1. Модель непрерывной катушечной обмотки

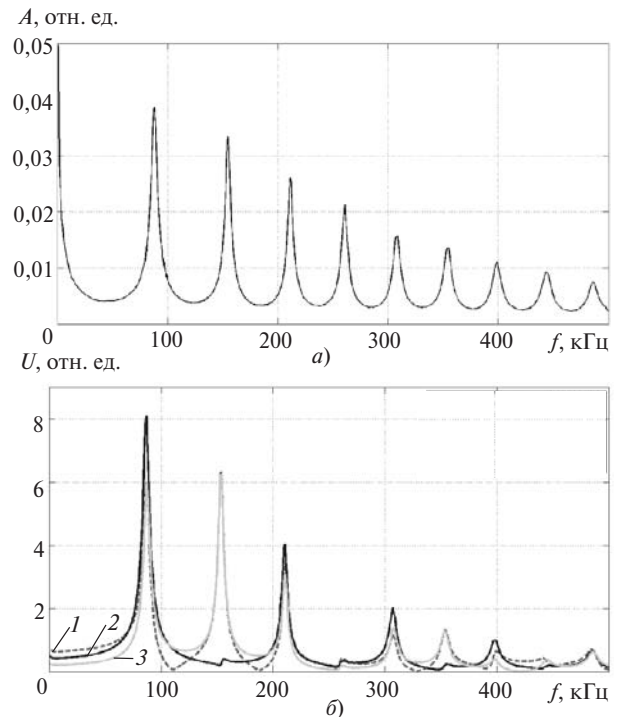


Рис. 2. Частотная характеристика обмотки (а) и передаточные функции напряжений переходов (б): 1 – переход 14-15; 2 – 26-27; 3 – 38-39

ответствующие собственным частотам колебаний обмотки. При этом, как видно из рис. 2, резонансные пики частотной характеристики обмотки имеют место на тех же частотах, что и резонансные пики передаточных функций напряжений переходов.

Для реальных трансформаторов, содержащих отводы и высоковольтные вводы, а также обмотки других типов, передаточные функции могут и не иметь таких выраженных резонансных пиков на частотах, соответствующих собственным частотам. Например, в случае обмотки, имеющей существенную продольную емкость, эта емкость может стать доминирующей в частотной характеристике в области высоких частот, определяя емкостный характер входной проводимости обмотки; частотная характеристика при этом на высоких частотах может иметь выраженный тренд к росту с увеличением частоты, а реактивная составляющая проводимости может существенно превосходить активную составляющую на частотах, соответствующих собственным частотам.

Это обстоятельство приводит к тому, что, как отмечалось, задачу определения собственных частот в общем виде следует решать путем поиска локальных максимумов активной проводимости обмотки, что может быть сделано следующим образом. В системах ЧАР измерительные кабели имеют длину порядка 5–10 м, и для устранения возможного влияния на результаты измерений в области

высоких частот эти кабели нагружены на согласующие сопротивления, равные волновому сопротивлению кабелей Z_c (как правило, 50 Ом). Таким образом, измеряемое выходное напряжение \bar{U}_2 по сути представляет собой величину, пропорциональную выходному току \bar{I}_2 , текущему на землю через «шунт» (согласующее сопротивление 50 Ом), сопротивление которого мало по сравнению с сопротивлением самой обмотки. С учетом этого проводимость обмотки

$$\bar{Y}_{12} = \frac{\bar{U}_2}{Z_c(\bar{U}_1 - \bar{U}_2)} = \frac{1}{Z_c \frac{\partial}{\partial j} \frac{1}{\bar{U}_1 - \bar{U}_2}} \quad (4)$$

Необходимо отметить, что в общем случае при измерении частотной характеристики отдельной обмотки согласующее сопротивление 50 Ом будет шунтировано емкостью на землю C_s высоковольтного ввода и отводов, соединяющих вывод обмотки с вводом и другими обмотками, а также емкостью измерительных кабелей и соединительных проводов. Значение этой шунтирующей емкости может составлять сотни – тысячи пФ. На частотах порядка МГц комплексное сопротивление этой емкости C_s становится соизмеримым с согласующим сопротивлением, а значит, далеко не весь выходной ток измеряемой обмотки идет через «шунт» 50 Ом. С учетом шунтирующей емкости формула (4) примет вид

$$\bar{Y}_{12} = \frac{\partial}{\partial j} \frac{1}{Z_c} + j\omega C_s \frac{\partial}{\partial j} \frac{1}{\bar{U}_1 - \bar{U}_2} - 1. \quad (5)$$

Таким образом, неучет емкости на землю относительно измеряемого вывода приводит к погрешности вычисления активной и реактивной составляющих входной проводимости обмотки по результатам ЧАР-измерений, что может особенно сильно влиять на частоты, близкие к единицам МГц. Вместе с тем, первые собственные частоты колебаний обмоток трансформаторов высокого напряжения, как отмечалось ранее, составляют, как правило, десятки – сотни кГц, и на таких частотах влияние шунтирующей емкости может считаться незначительным.

Как отмечалось, резонансные частоты, имеющиеся в частотной характеристике отдельной обмотки, соответствуют не только собственным частотам колебаний обмоток. Отличить собственные частоты колебаний обмоток от частот, соответствующих взаимодействию между обмотками, можно следующим образом.

Как отмечалось в [1], при питании первичной обмотки напряжению на первой собственной частоте обмотки соответствуют узлы стоячей волны по

краям этой обмотки. Ток на первой собственной частоте отстает от напряжения на $1/4$ пространственного периода [8]; таким образом, ток имеет узел в середине обмотки и разную полярность в верхней и нижней половинах питаемой обмотки. Это приводит к тому, что ЭДС, наводимые в витках вторичной обмотки, взаимно компенсируются, а магнитный поток, создаваемый первичной обмоткой, проникает в стержень магнитной системы, не встречая реакции со стороны вторичной обмотки. Таким образом, на частоте, соответствующей первой собственной частоте колебаний первичной обмотки, замыкание накоротко вторичной обмотки практически не влияет на полное входное сопротивление этой первичной обмотки. Как следствие, частотные характеристики первичной обмотки трансформатора, полученные при разомкнутой и замкнутой вторичной обмотке, практически совпадают, начиная с частот, близких к первой собственной частоте колебаний первичной обмотки.

Вместе с тем, состояние вторичной обмотки, ее замыкание и размыкание, на частотах много ниже первой собственной частоты оказывает влияние на проникновение магнитного потока в стержень магнитопровода и на путь, по которому замыкается этот поток, а потому существенно влияет на значение полного входного сопротивления первичной обмотки и резонансные частоты межобмоточного взаимодействия.

Таким образом, первая собственная частота первичной обмотки может быть определена с помощью ЧАР-измерений частотных характеристик этой обмотки относительно входных зажимов при разомкнутой и замкнутой накоротко вторичной обмотке с последующим выявлением первой резонансной частоты, на которой достигается локальный максимум активной проводимости обмотки и совпадение частотных характеристик при разомкнутой и замкнутой вторичной обмотке.

В качестве примера далее представлены частотная характеристика и активная составляющая проводимости обмотки G_{12} обмотки высшего напряжения (ВН) двухобмоточного трансформатора (рис. 3, а, б соответственно), полученные при подаче напряжения на линейный вывод А и измерении напряжения на выводе нейтрали N обмотки ВН при разомкнутой и замкнутой вторичной обмотке низшего напряжения (НН).

Как видно из рис. 3, частотные характеристики обмотки ВН при разомкнутой и замкнутой НН существенно отличаются до частот 8–10 кГц как по амплитуде, так и по значениям частот резонансных пиков, а при частоте около 13 кГц и выше частотные характеристики практически совпадают как по амплитуде, так и по значениям частот резонансных

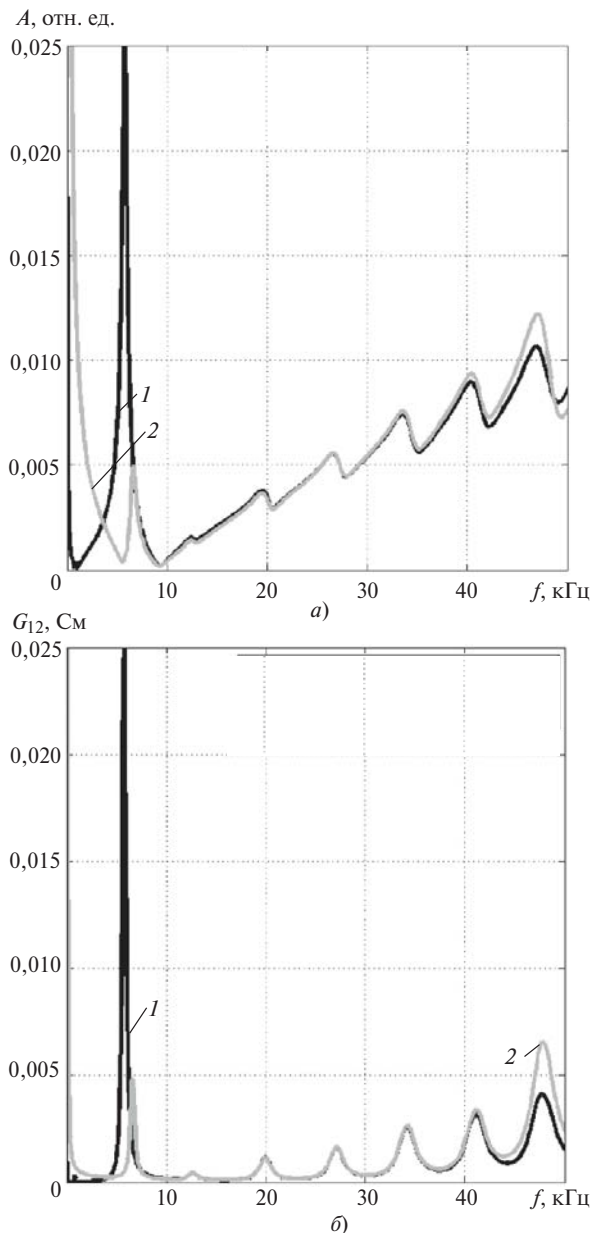


Рис. 3. Частотные характеристики (а) и активная проводимость (б) первичной обмотки ВН: 1 – обмотка НН – разомкнута; 2 – замкнута

пиков. Таким образом, в рассматриваемом примере резонансные пики на частотах около 5–7 кГц имеют отношение к частотам межобмоточного взаимодействия, а резонансный пик на частоте около 13 кГц соответствует первой собственной частоте обмотки ВН.

Выводы. 1. Одним из ключевых вопросов при анализе резонансных перенапряжений в обмотках трансформаторов является определение резонансных частот этих обмоток. В частотной характеристике отдельной обмотки присутствуют резонансные частоты, соответствующие межобмоточному взаимодействию, собственным колебаниям в обмотке и колебаниям в ее отводах, при этом наибольший интерес при рассмотрении резонансных

явлений в питаемой обмотке трансформатора представляют первые собственные частоты колебаний обмотки.

2. Оценка собственных частот колебаний обмотки с разной степенью точности может быть выполнена аналитически или с помощью математического моделирования. Более точное определение собственных частот может быть выполнено экспериментально измерением частотной характеристики обмотки с помощью измерительных систем для частотного анализа реакции обмоток и последующего определения максимумов активной составляющей полной входной проводимости питаемой обмотки трансформатора.

3. Выделение из частотного спектра обмотки резонансных частот, соответствующих ее собственным частотам колебаний, может быть выполнено путем выполнения измерений частотных характеристик этой обмотки относительно входных зажимов как при разомкнутой, так и при замкнутой накоротко вторичной обмотке с последующим выявлением первой резонансной частоты, на которой достигается локальный максимум активной проводимости обмотки и совпадение частотных характеристик первичной обмотки при разомкнутой и замкнутой вторичной обмотке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ларин В.С. Резонансные перенапряжения в обмотках трансформаторов. Ч. 1. Условия возникновения и защитные мероприятия. – Электричество, 2015, № 11, с. 33–40.
2. IEC 60076-18 ed. 1. Power transformers – Part 18: Measurement of frequency response, 2012, 94 p.
3. Ларин В.С. Наведенные перенапряжения на холостых обмотках трансформаторов: оценка напряжений и защитные мероприятия. – Электротехника, 2015, № 7, с. 51–58.
4. Лоханин А.К. Частоты собственных колебаний обмоток трансформаторов. – Электричество, 1973, № 5, с. 53–56.
5. Силовые трансформаторы. Справочная книга / Под. ред. С.Д. Лизунова, А.К. Лоханина. – М.: Энергоиздат, 2004, 616 с.
6. Larin V.S., Matveev D.A., Zhuikov A.V. Approach to analysis of resonance phenomena and overvoltages due to interaction between power transformer and external network. Report PS1-ID084, CIGRE SC A2 & C4 JOINT COLLOQUIUM, 8 – 14 September 2013, Zurich (Switzerland).
7. Долгинов А.И. Техника высоких напряжений в электроэнергетике. – М.: Энергия, 1968, 464 с.
8. CIGRE Brochure 577A. «Electrical Transient Interaction between Transformers and the Power System – Part 1: Expertise», Joint Working Group A2/C4.39. – CIGRE, April 2014, 176 p.

[31.03.15]

Авторы: Ларин Василий Серафимович окончил Институт электроэнергетики Московского энергетического института (Технического университета) (МЭИ (ТУ)) в 2004 г. В 2007 г. защитил кандидатскую диссертацию «Исследование и разработка эффективного метода расчета внутренней изоляции силовых трансформаторов». Начальник отдела трансформаторов Всероссийского электротехниче-

ского института (ВЭИ), регулярный член Исследовательского комитета А2 «Трансформаторы» СИГРЭ и представитель Российского национального комитета СИГРЭ в комитете А2 СИГРЭ.

Волков Алексей Юрьевич окончил Институт электроэнергетики МЭИ (ТУ) в 2008 г. Начальник сектора высоковольтных и динамических испытаний силовых трансформаторов ВЭИ.

Elektrichestvo (Electricity), 2015, No. 12, pp. 20–25.

Resonance Overvoltages in Transformer Windings. Part 2: Determination of the Winding Resonant Frequencies

LARIN Vasily Serafimovich (All Russian Electrotechnical Institute (AREI), Moscow, Russia) – Head of the Department, Cand. Sci. (Eng.)

VOLKOV Aleksei Yur'yevich (AREI, Moscow, Russia) – Head of the Sector

In the analysis of resonance overvoltages in transformer windings the determination of the resonant frequencies of these windings is one of the key issues. The article describes the approaches to the estimation of the resonant frequencies by analytical formulas and with the help of mathematical modeling and experimental determination by measuring of frequency characteristics of the windings. Application of frequency response analysis of the windings to the determination of the resonance frequencies and the identification of the winding self frequencies in the frequency spectrum are considered..

Key words: transformers windings, resonance overvoltages, winding oscillation frequencies, frequency analysis

REFERENCES

1. **Larin V.S.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2015, No. 12, pp. 33–40.
2. **IEC 60076-18 ed. 1.** Power transformers – Part 18: Measurement of frequency response, 2012, 94 p.
3. **Larin V.S.** *Elektrotehnika – in Russ. (Power Engineering)*, 2015, No. 7, pp. 51–58.
4. **Lokhanin A.K.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 1973, No. 5, pp. 53–56.
5. **Silovye transformatory. Spravochnaya kniga/Pod. Red. S.D. Lizunova, A.K. Lokhanina** (Power Transformers. Reference book/Edit. by S.D. Lizunov and A.K. Lokhanin). Moscow, Publ. Energoizdat, 2004, 616 p.

6. **Larin V.S., Matveev D.A., Zhuikov A.V.** Approach to analysis of resonance phenomena and overvoltages due to interaction between power transformer and external network. Report PS1-ID084, CIGRE SC A2 & C4 JOINT COLLOQUIUM, 8–14 September 2013, Zurich (Switzerland).

7. **Dolginov A.I.** *Tekhnika vysokikh napryazhenii v elektroenergetike* (High-voltage engineering in electric power engineering). Moscow, Publ. «Energiya», 1968, 464 p.

8. **CIGRE Brochure 577A.** «Electrical Transient Interaction between Transformers and the Power System – Part 1: Expertise», Joint Working Group A2/C4.39. – CIGRE, April 2014, 176 p.

* * *

Внимание предприятий, организаций, НИИ, вузов России и зарубежных фирм!

Журнал «Электричество» предоставляет свои страницы для

- РЕКЛАМЫ ИЗДЕЛИЙ отечественных предприятий и зарубежных фирм в области энергетики, электротехники, электроники, автоматики
- ПУБЛИКАЦИИ ОБЪЯВЛЕНИЙ о научных симпозиумах, конференциях, совещаниях, семинарах
- ДРУГОЙ ИНФОРМАЦИИ, соответствующей тематике журнала

Сообщаем, что журнал поступает к зарубежным подписчикам; полные тексты статей размещены на сайте www.elibrary.ru

Напоминаем наш адрес: 101000 Москва, Главпочтамт, а/я 648.

Тел./факс (495)362-7485; E-mail: etr1880@mail.ru