

* * *

Электричество, 2016, № 1, с. 20–24.

Резонансные перенапряжения в обмотках трансформаторов. Ч. 3. Измерение напряжения в обмотках на резонансных частотах

ЛАРИН В.С.

Рассмотрены вопросы экспериментальной оценки наибольших кратностей резонансных перенапряжений в обмотках трансформатора при воздействии на обмотку низковольтного переменного напряжения и применения для этой цели измерительных систем для частотного анализа реакции обмоток (ЧАР). Представлены результаты анализа влияния измерительных цепей на отклонения по частоте и амплитуде измеряемых напряжений, выполненные экспериментально на физической модели катушечной обмотки высокого напряжения. Показано, что для обеспечения высокой точности измерений следует использовать высокочастотные измерительные щупы с малой входной емкостью.

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

Ранее в [1] были рассмотрены условия развития и особенности резонансных перенапряжений в обмотках силовых трансформаторов, а в [2] – вопросы оценки резонансных частот обмоток трансформаторов. Не менее важным вопросом является оценка напряжений, воздействующих на элементы изоляции обмоток при резонансных перенапряжениях, поскольку однозначно сказать, являются ли возможные резонансные перенапряжения опасными для конкретного трансформатора, можно лишь по результатам сравнения воздействующих напряжений с допустимыми значениями.

Необходимо отметить, что проведение экспериментальных измерений воздействующих напряжений на элементах изоляции обмоток на трансфор-

маторе, находящемся в эксплуатации, не представляется возможным ни технически, ни экономически. В связи с этим определение воздействующих напряжений в обмотках трансформатора возможно лишь на основе математического моделирования или экспериментальных измерений на трансформаторе при воздействии низкого напряжения.

Один из подходов к численному моделированию резонансных перенапряжений в обмотках трансформаторов, возникающих при взаимодействии трансформатора с электрической сетью, изложен в [3, 4]. Он основан на применении специализированной программы расчета импульсных перенапряжений и продольной изоляции обмоток трансформаторов (ГТ) для расчета параметров

детализированной схемы замещения трансформатора и последующего импорта полученных параметров в программу расчета переходных процессов в электрических сетях (EMTLab). Такой подход позволяет получить напряжения на внутренних элементах обмоток трансформатора при переходных процессах во внешней сети, вызванных, например, коммутациями выключателей и разъединителей или короткими замыканиями (КЗ) в питающих кабельных линиях.

Необходимо отметить, что на амплитуды резонансных перенапряжений в обмотках трансформатора существенным образом влияет затухание на высоких частотах, а потому неточный учет потерь в обмотках и магнитопроводе может приводить к существенным ошибкам определения амплитудных значений напряжений в обмотках на резонансных частотах. По этой причине аналитическая оценка и математическое моделирование, выполняемые с приближенным учетом потерь в обмотках, могут приводить к завышенным результатам оценки воздействующих напряжений.

Для более точного определения напряжений предпочтительным является непосредственное измерение напряжений в обмотках при воздействии низкого переменного напряжения.

Техника измерений напряжений в обмотках на резонансных частотах. Принципиальной особенностью условий эксплуатации в части резонансных перенапряжений является то, что на трансформатор воздействуют затухающие колебательные напряжения, а потому перенапряжения с предельными кратностями за время действия возмущения могут не успеть развиться [1]. Вместе с тем, предельные кратности определенно представляют интерес как наихудший случай.

На практике оценка предельно возможной кратности резонансных перенапряжений в обмотках может быть выполнена путем подачи на первичную обмотку трансформатора незатухающего переменного напряжения амплитудой в единицы—десятки вольт и регистрации напряжений на промежуточных точках обмотки. Очевидно, что сделать такое возможно только в условиях завода-изготовителя. Проведение таких измерений по сути имеет много общего с импульсным обмером трансформатора, а потому может быть совмещено с ним.

Вместе с тем, по сравнению с импульсным обмером измерения напряжений в условиях резонанса имеют свои особенности, основные из которых перечислены далее.

1. Импульсные обмеры масляных трансформаторов, как правило, проводят без масла, в результате чего эквивалентная диэлектрическая проницаемость среды, определяющая емкость обмоток на землю, оказывается меньше в первом приближении более чем в 2 раза. При выполнении измерений ре-

зонансных перенапряжений в обмотках также без масла получаемые резонансные частоты и амплитуды напряжений в обмотках будут несколько выше, чем при заполнении трансформатора маслом, а значит, получаемые при этом кратности резонансных перенапряжений следует рассматривать как несколько завышенные значения, представляющие собой оценку верхних предельных значений.

2. Как правило, подключение измерительной аппаратуры к промежуточным точкам обмотки выполняют с помощью соединительных проводов и измерительных кабелей, что эквивалентно включению их емкости на землю в этих точках. В случае если емкость на землю подключаемых объектов окажется сопоставимой с емкостью на землю отдельных частей обмотки в этих промежуточных точках, можно ожидать искажения значений резонансных частот и амплитуд резонансных напряжений. Как следствие, для обеспечения точности измерений следует избегать использования измерительных кабелей с большой емкостью и длинных соединительных проводов и в общем случае использовать подключение к обмотке элементов измерительной аппаратуры с минимально возможной емкостью на землю.

3. С учетом изложенного в п. 2 измерение напряжений на фиксированных частотах, соответствующих собственным частотам колебаний обмоток, может оказаться неэффективным. При подключенных соединительных проводах наибольшие значения напряжений в отдельных точках обмотки могут достигаться на других частотах, в то время как в связи с сильной частотной зависимостью резонансных напряжений даже небольшой сдвиг по частоте может привести к существенному снижению измеряемых значений напряжения. Для того чтобы более точно определить наибольшее значение напряжения в некоторой промежуточной точке обмотки, целесообразно измерение напряжений не на нескольких фиксированных частотах, а в достаточно широком диапазоне частот.

С учетом изложенного измерение резонансных перенапряжений в обмотках может быть наиболее удобно выполнено с помощью измерительных систем для частотного анализа реакции обмоток [5, 6], частота выходного сигнала которых изменяется в диапазоне частот от единиц Гц до единиц МГц. С этой целью в измерительной системе следует исключить из канала измерения реакции обмоток штатные измерительные кабели и согласующее сопротивление 50 Ом и заменить их измерительным щупом от цифрового осциллографа, например, со встроенным делителем 10:1, имеющим полосу пропускания десятки – сотни МГц, входное сопротивление 10 МОм и малую входную емкость порядка 10–20 пФ. Использование таких измерительных

щупов позволит свести к минимуму влияние измерительного тракта на резонансные частоты и амплитуду напряжений в обмотках.

В качестве примера далее представлены результаты измерений передаточных функций и напряжений в условиях резонанса на модели непрерывной обмотки [2], состоящей из 52 катушек. Полнота получаемых измерений в значительной степени определяется числом доступных для измерений промежуточных выводов исследуемой обмотки. В рассматриваемой модели обмотки промежуточные выводы сделаны от переходов после каждой второй катушки. Последовательное измерение в широком диапазоне частот (от десятков Гц до единиц МГц) передаточных функций для каждого перехода в этом случае позволяет построить пространственно-частотный спектр максимальных значений напряжения в обмотке (рис. 1), а также распределение напряжения в обмотке при частотах, равных собственным частотам обмотки (рис. 2).

Анализ влияния измерительной схемы на результаты измерений. Поскольку подключаемые к обмотке элементы измерительной схемы оказывают влияние на результаты измерений, в методическом плане немаловажной задачей является качественная и количественная оценка этого влияния.

Подключение к промежуточной точке обмотки внешних элементов эквивалентно включению в эту точку дополнительной емкости, которая в общем случае приводит к некоторому отклонению значения напряжения и сдвигу частоты, при которой достигается максимум напряжения вниз или вверх относительно некоторой собственной частоты обмотки. Такое отклонение резонансной частоты некоторой точки обмотки от собственной частоты колебаний обмотки может быть использовано в качестве косвенного индикатора возможных отклонений в результатах измерений, привнесенных измерительной схемой. Чем больше отклонение резонансных частот напряжений отдельных переходов от резонансных частот обмотки (собственных частот колебаний обмотки), определяемых по результатам ЧАР-измерений, тем большую погрешность

следует ожидать в измерении максимальных значений напряжений этих переходов.

Для рассматриваемой физической модели обмотки [2] была выполнена экспериментальная оценка влияния способов подключения измерительного тракта к промежуточным точкам этой обмотки. Были рассмотрены следующие варианты подключения к обмотке с помощью:

1) высокочастотного измерительного щупа (Tektronix P6139A с полосой пропускания 500 МГц, входным сопротивлением 10 МОм, входной емкостью 8 пФ и коэффициентом деления 10:1);

2) высокочастотного измерительного щупа по варианту № 1 с подключением параллельно ему второго такого же щупа (имитация измерительного щупа с удвоенной входной емкостью);

3) соединительного кабеля длиной 2 м с волновым сопротивлением 75 Ом (погонная емкость около 67 пФ/м);

4) то же длиной 1 м с волновым сопротивлением 50 Ом (погонная емкость около 100 пФ/м);

5) то же длиной 2 м с волновым сопротивлением 50 Ом (погонная емкость около 100 пФ/м).

Измерения выполнены для двух переходов обмотки – между катушками 26 и 27 и катушками 14 и 15 (далее – переходы «26–27» и «14–15»), соответствующих середине и примерно четверти высоты обмотки. Такой выбор переходов связан с тем, что в середине обмотки достигаются пучности напряжения первой и третьей собственной частоты обмотки, а в четверти высоты – второй собственной частоты (рис. 2).

Для каждого варианта выполнялось измерение передаточных функций в широком диапазоне частот с последующим определением первых пяти резонансных частот и соответствующих им значений напряжений. Полученные значения резонансных частот сравнивались с собственными частотами колебаний обмотки, определенными по результатам предварительного измерения частотной характеристики обмотки и представляющими собой частоты обмотки без подключения к промежуточным точкам обмотки какой-либо дополнительной емкости.

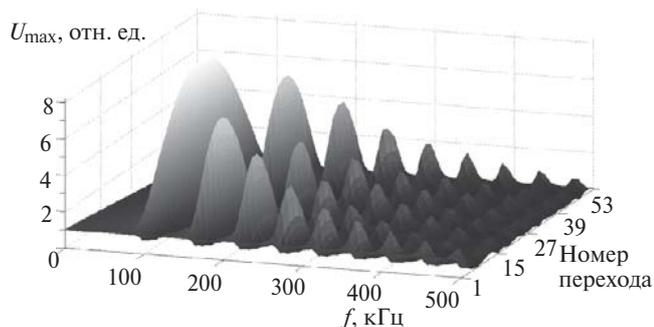


Рис. 1. Пространственно-частотный спектр максимальных значений напряжения в обмотке

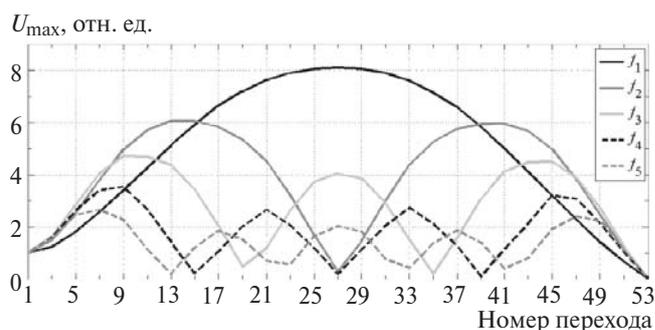


Рис. 2. Распределение напряжения в обмотке на первых пяти собственных частотах обмотки

Поскольку любое подключение к обмотке, имея отличную от нуля входную емкость, априори вносит искажения в измеряемые напряжения, точная экспериментальная оценка отклонений по амплитуде напряжения переходов в зависимости от дополнительной емкости затруднена. Наиболее точно эта оценка может быть сделана в сравнении с вариантом подключения № 1, которому соответствует минимальная входная емкость, хотя такое сравнение и не характеризует истинную погрешность измерений амплитуды напряжения.

Результаты оценки отклонений по частоте и амплитуде напряжения, полученные для перехода «26–27» и «14–15», приведены на рис. 3.

Из полученных зависимостей отклонений по частоте и амплитуде наглядно видно, что для обеспечения высокой точности измерений резонансных напряжений в обмотках трансформаторов необходимо применять такое подключение к измеряемым точкам обмотки, которое бы обеспечило минимально возможную входную емкость измерительной цепи. Так, для рассмотренной модели обмотки применение измерительной цепи с входной емкостью не более 20 пФ обеспечивает отклонения по резонансным частотам не более 5%. По этим соображениям подключение к обмотке, выполненное соединительными коаксиальными кабелями, которое вносит существенную дополнительную емкость в точку подключения, следует считать недопустимым.

Другим вариантом подключения, широко используемым на практике при проведении импульсных обмеров, является подключение с помощью од-

ножилых соединительных проводов (без внешнего экрана) длиной несколько метров, соединяемых с входами измерительного устройства или промежуточными делителями напряжения. Емкость такого провода можно оценить значением порядка 10 пФ/м, а входную емкость высокочастотного цифрового осциллографа (аналого-цифрового преобразователя) или промежуточного делителя – порядка 10–20 пФ. Даже при длине соединительного провода в 1 м можно ожидать включения к измеряемой точке обмотки дополнительной емкости не менее 20 пФ. Таким образом, такое подключение можно рассматривать как обеспечивающее сравнительно неплохую точность измерений, но лишь при малой длине соединительного провода.

Наиболее предпочтительным для проведения измерений резонансных напряжений в обмотках является применение высокочастотных измерительных щупов, имеющих входную емкость не более 10 пФ и полосу пропускания сотни МГц.

Выводы. 1. Оценка предельных кратностей резонансных перенапряжений в обмотках трансформаторов может быть выполнена при проведении в условиях завода-изготовителя измерений на низком напряжении с подачей на первичную обмотку незатухающего переменного напряжения и измерения напряжений в промежуточных точках этой обмотки и других обмоток.

2. Измерения предельных кратностей перенапряжений целесообразно проводить с помощью систем для частотного анализа реакции обмоток (FRA-систем), что позволяет автоматически получить

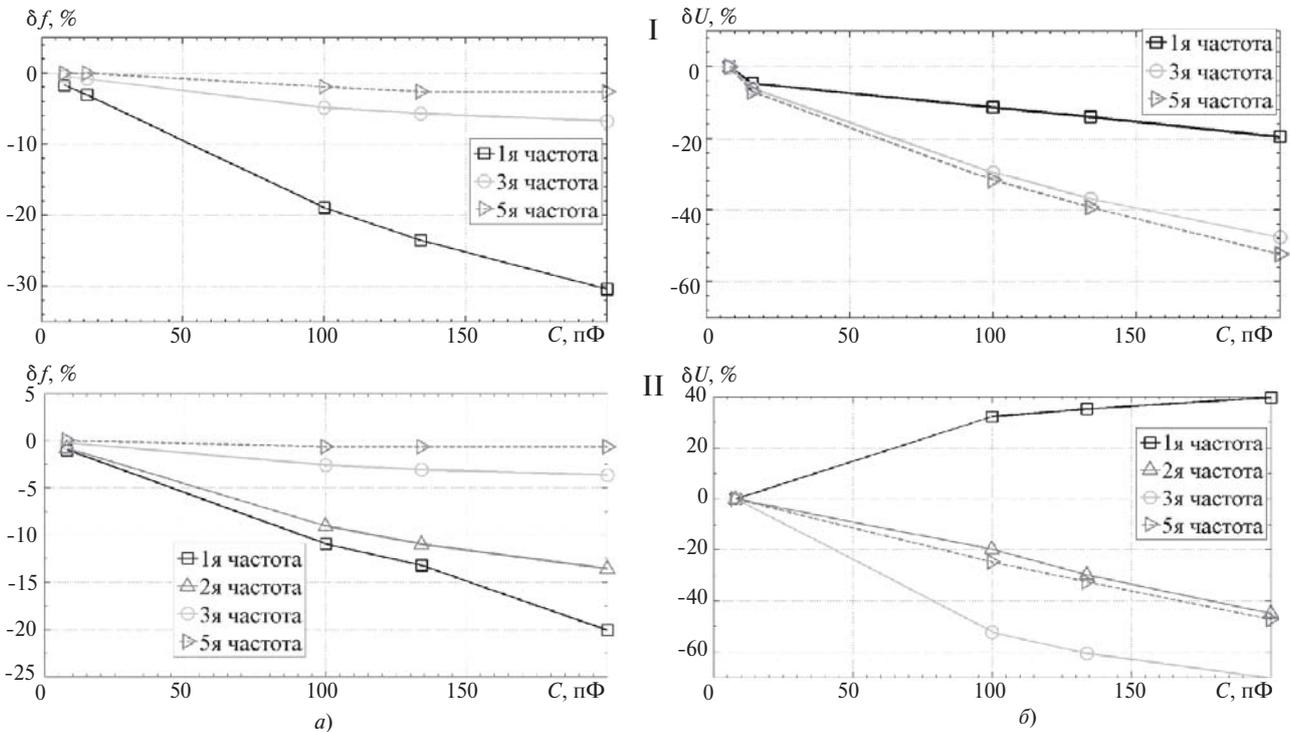


Рис. 3. Оценка отклонений по частоте (а) и амплитуде (б) напряжения перехода «26–27» (I) и перехода «14–15» (II) в зависимости от подключенной к переходу дополнительной емкости

частотные спектры кратностей перенапряжений в широком диапазоне частот. Для целей проведения измерений кратностей перенапряжений в используемой измерительной системе следует исключить на канале измерения реакции обмоток штатные измерительные кабели и согласующее сопротивление.

3. Любое подключение к промежуточным точкам обмоток равносильно включению к этим точкам дополнительной емкости, что приводит к отклонению получаемых предельных кратностей перенапряжений как по частоте, так и по амплитуде. Для обеспечения высокой точности следует использовать такое подключение к обмотке, которое бы обеспечило минимально возможную входную емкость цепи измерения.

4. Наиболее предпочтительным для целей измерения является применение высокочастотных измерительных щупов с входной емкостью не более 10 пФ и полосой пропускания сотни МГц. Допустимо также прямое подключение измерительного устройства к промежуточной точке обмотки с помощью соединительного провода и промежуточного делителя напряжения, при этом длина этого провода должна быть минимально возможной. Подключение измерительного устройства к промежуточным точкам обмотки с помощью коаксиальных кабелей следует считать недопустимым ввиду большой дополнительной емкости такого подключения.

Автор выражает благодарность А.Ю. Волкову и К.О. Маркову, принимавшим участие в проведении измерений на модели обмотки.

Elektrichestvo (Electricity), 2016, No. 1, pp. 20–24.

Resonance Overvoltages in Transformer Windings. Part 3. Measurement of Voltages in the Windings of the Transformers at the Resonant Frequencies

LARIN Vasily Serafimovich (*All-Russian Electrotechnical Institute, Moscow, Russia*) – Head of the Department, Regular member of the CIGRE Study Committee A2 «Transformers», Cand. Sci. (Eng.)

In the article the questions of experimental estimation of the highest per unit resonant overvoltages in the transformer windings under low AC voltage excitation and usage for this purpose the measuring systems for frequency response analysis (FRA). The results of the analysis of the influence of measuring circuits on the frequency and amplitude deviation of measured voltages which were performed experimentally on a physical model of high voltage disc-type winding. It is shown that to provide high accuracy of measurements the high-frequency measuring probes with low input capacitance should be used.

Key words: *transformers, windings, resonance overvoltages, winding oscillation, frequency analysis, voltage measurement*

REFERENCES

1. Larin V.S. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2015, No. 11, pp. 33–40.
2. Larin V.S., Volkov A.Yu. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2015, No. 12, pp. 20–24.
3. Larin V.S., Matveyev 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).

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. Ларин В.С., Волков А.Ю. Резонансные перенапряжения в обмотках трансформаторов. Ч. 2. Условия возникновения и защитные мероприятия. – *Электричество*, 2015, № 12, с. 20–25.
3. Larin V.S., Matveyev 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).
4. Ларин В.С., Жуиков А.В., Матвеев Д.А. Подход к анализу резонансных явлений и перенапряжений, возникающих при взаимодействии силового трансформатора с электрической сетью. – *Энергетик*, 2013, № 12, с. 21–25.
5. Soloot A.H., Hiidalen H.K., Gustavsen B. Upon the improvement of the winding design of wind turbine transformers for safer performance within resonant overvoltages. – CIGRE SC A2 & C4 Joint Colloquium, 8–14 September 2013, Zurich (Switzerland).
6. Ларин В.С. Наведенные перенапряжения на холостых обмотках трансформаторов: оценка напряжений и защитные мероприятия. – *Электротехника*, 2015, № 7, с. 51–58.

[31.03.15]

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

4. Larin V.S., Zhuikov A.V., Matveyev D.A. *Energetik – in Russ. (Power Engineering Specialist)*, 2013, No. 12, pp. 21–25.
5. Soloot A.H., Hiidalen H.K., Gustavsen B. Upon the improvement of the winding design of wind turbine transformers for safer performance within resonant overvoltages. – CIGRE SC A2 & C4 Joint Colloquium, 8–14 September 2013, Zurich (Switzerland).
6. Larin V.S. *Elektrotehnika – in Russ. (Power Engineering)*, 2015, No. 7, pp. 51–58.

