

УДК 621.3.013.62; 621.314.21; 621.314.222.8

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРОЦЕССЫ И УСЛОВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ РЕЗОНАНСНЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В ОБМОТКАХ ТРАНСФОРМАТОРА

Сабат Мирослав Богданович,

ассистент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий, городов и сельского хозяйства» Национального Университета «Львовская политехника», Украина, 79013, г. Львов, ул. С. Бандеры, 12.
E-mail: myroslav003@gmail.com

Никонец Алексей Леонидович,

аспирант кафедры «Электрические станции» Национального Университета «Львовская политехника», Украина, 79013, г. Львов, ул. С. Бандеры, 12.
E-mail: nykonets@gmail.com

Венгер Владимир Петрович,

аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий, городов и сельского хозяйства» Национального Университета «Львовская политехника», Украина, 79013, г. Львов, ул. С. Бандеры, 12.
E-mail: vol.venher@gmail.com

Венгер Виктор Петрович,

аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий, городов и сельского хозяйства» Национального Университета «Львовская политехника», Украина, 79013, г. Львов, ул. С. Бандеры, 12.
E-mail: venherviktor@gmail.com

Актуальность работы: На данном этапе развития сетей стран СНГ приоритетной является проблема повышения надежности работы трансформаторов, основная часть парка которых давно выработала свой ресурс. Проблема повышения надежности актуальна также для проектирования, испытаний и изготовления новых трансформаторов.

Цель работы: с помощью экспериментальных исследований сформулировать условия, при которых имеющиеся уровни витковой изоляции будут недостаточными для надежной эксплуатации трансформатора в электрической сети.

Методы исследования: частотные методы натурного эксперимента и анализа электрических цепей.

Результаты: Впервые установлено, что резонансные перенапряжения в частях обмотки – основная причина витковых замыканий в обмотках трансформаторов при действии на них со стороны сети внутренних перенапряжений. Усиление продольной изоляции всей обмотки даст возможность повысить надежность работы трансформаторов. Как альтернатива, возможна разработка мероприятий для сети, устраняющих опасные воздействия на конкретных частотах.

Выводы: Кроме классического вида внутреннего резонанса напряжений между индуктивностью обмотки и емкостью изоляции на дискретной частоте установлен факт существования резонансов между конструктивно идентичными частями обмотки высокого напряжения в варианте резонанса токов, существующего в широком диапазоне частот, и варианте резонанса напряжения, существующего в нескольких дискретных диапазонах частот. Впервые установлен механизм возникновения перенапряжений между частями обмотки трансформатора – резонанс между напряжениями взаимной индукции частей обмотки, который обусловлен обменом мощности между частями обмотки по путям замыкания магнитных потоков вне магнитопровода. При появлении любых перенапряжений со стороны сети внутри трансформатора всегда развиваются перенапряжения, которые принципиально будут иметь значения большие, чем приложенные.

Ключевые слова:

Трансформатор, резонансные перенапряжения, электромагнитные процессы, продольная изоляция, частотный метод исследования.

Анализ результатов выполненных исследований по изучению явления внутреннего резонанса

Между традиционными научными подходами к обоснованию необходимого уровня изоляции трансформаторов, обобщенными в действующей нормативной базе [1–3], и опытом эксплуатации [4, 5] существует противоречие, которое состоит в невозможности объяснить причины повреждений продольной изоляции обмоток при действии внутренних перенапряжений со стороны распределительной сети.

Единственной причиной такого противоречия может быть несоответствие используемых наукой методов исследования существу исследуемой проблемы.

Исторически все методы исследования следует разделить на методы до и после наступления компьютерной Эры. Именно первые находились в распоряжении исследователей, чьи рекомендации были использованы при формировании существующей нормативной базы.

Трудоемкость математического описания исследуемого явления вынуждала искать рациональные (упрощенные) решения.

Математическая постановка технической задачи является самой сложной и важной частью работы. Важны не столько выбираемые математические методы расчета, сколько выбранные упрощения первоначальной, подлежащей решению физической задачи.

Любое электрооборудование с обмотками высокого напряжения (ЭОВН) состоит как минимум из обмоток, магнитопровода и изоляции, которые размещены в корпусе. Как правило, на этапах проектирования электрооборудования и исследования режимов работы электросетей не учитывают все возможные взаимосвязи между указанными конструктивными составляющими ЭОВН.

Практически до конца XX в. основным допущением при расчете электромагнитных процессов в ЭОВН было пренебрежение электрической проводимостью и токами утечки в изоляции [6]. Это допущение привело к важному теоретическому выводу, сформулированному в [1. С. 65–66]: «...внутренние перенапряжения, в сравнении с импульсными, характеризуются медленным изменением напряжения, поэтому их действие практически одинаково для всех электрически соединенных точек подстанции», то есть на продольную изоляцию они не действуют. Этот вывод важен не только потому, что он сформулирован авторитетным специалистом в области изоляции. На основании этого вывода сформулированы рекомендации [1–3], которые положены в основу проектирования, изготовления, эксплуатации и высоковольтных испытаний всего существующего парка высоковольтного оборудования.

Остается исследовать процессы в трансформаторе при действии импульсных перенапряжений.

Принципиальной особенностью рассматриваемых объектов исследования, (силовые трансформаторы, трансформаторы напряжения) является то, что это объекты с распределенными параметрами, между продольными элементами обмоток которых существует явление взаимной индукции. Поэтому все попытки анализа процессов внутри объекта с использованием теории расчета цепей с сосредоточенными параметрами были обречены на неудачу.

Существует небольшое количество моделей, в которых сделана попытка анализа перенапряжений в обмотках трансформаторов с учетом распределенности их параметров [7–9]. Авторами одной из них [8] предложена схема замещения обмотки и составлена система уравнений, которая её описывает. Основная трудность решения такой системы, которая характерна для всех публикаций [7–9], состоит в необходимости однозначного определения функций взаимной индукции между разными витками обмотки, в том числе с учетом нелинейных свойств магнитопровода. Поэтому предложено практически рассматривать переходный процесс упрощенно, разбивая его на три этапа, кото-

рые изложены в [8]. Предложенный в [8] упрощенный подход в оценке кратностей перенапряжений вдоль обмотки высокого напряжения (ВН) как разнице напряжений в установившемся и начальном режимах относится в первую очередь к импульсным воздействиям со стороны сети. Считается также, что, благодаря однородности обмотки ВН, установившееся распределение напряжения вдоль обмотки ВН для сетей с заземленной нейтралью описывается наклонной прямой, а для сетей с изолированной нейтралью – горизонтальной прямой линией. В процессе развития собственных колебаний напряжение будет превышать установившееся значение, приближаясь к нему по мере затухания колебаний.

Значительная часть всех видов электрооборудования с обмотками высокого напряжения преждевременно выходит из строя из-за повреждения изоляции. Статистика аварийности трансформаторов, приведенная в «Докладе IEEE по результатам регистрации данных о повреждении силовых трансформаторов» [10], свидетельствует, что из 164 зафиксированных случаев 10 % повреждений касаются ошибочных действий персонала, 17 % – дефектов диэлектриков и более 25 % возникают по неизвестным причинам. Таким образом, почти в четверти случаев аварий вообще не установлены причины повреждения оборудования.

Важным выводом [10] является утверждение о том, что невозможно предсказать влияние перенапряжений на трансформатор без детального анализа электроэнергетической системы в каждом конкретном случае. Попробуем выяснить причины установленной взаимосвязи между условиями эксплуатации электрооборудования с обмотками высокого напряжения (ЭОВН) в конкретной точке сети и надежностью его работы.

Для решения поставленной задачи проанализируем возможные воздействия на изоляцию оборудования с целью выявления тех особенностей, которые могли бы привести к его повреждению. Как известно, на изоляцию оборудования действует рабочее напряжение, атмосферные и внутренние перенапряжения.

Режимы работы сетей организуются таким образом, чтобы величина рабочего напряжения в любой точке не превышала допустимую для оборудования величину. Поэтому этот фактор из рассмотрения можно исключить.

Влияние атмосферных воздействий на оборудование изучено достаточно полно. Разработан целый комплекс мероприятий [2, 11–13], обеспечивающих ограничение воздействий допустимыми значениями. В этом отношении сказать, что какие-то узлы сети защищены лучше, а другие хуже, оснований нет.

Внутренние перенапряжения характеризуются многообразием причин их возникновения, величиной их амплитуды, формой и длительностью [14–20]. Следует обратить внимание, что коммутационные воздействия по отношению к изоляции

какого-либо оборудования в большинстве случаев можно рассматривать как вынуждающую ЭДС сложной формы, параметры которой не зависят от параметров изоляции рассматриваемого объекта. Внутренние перенапряжения, воздействующие на зажимы электрооборудования разных видов и классов напряжения, существенно отличаются по форме. Тем не менее, для испытаний коммутационными волнами должно быть стандартизировано минимальное число форм волны [1]. Ограничиться одной волной не представляется возможным ввиду существенно разнящейся зависимости электрической прочности изоляции разного вида от формы воздействующего внутреннего перенапряжения [1]. Формы импульса (апериодическая или колебательная) и его параметры должны быть указаны в нормативной документации на электрооборудование отдельных видов [2]. Форма волны для испытания внутренней изоляции трансформаторов, выключателей, кабелей и т. п. пока не установлена; ещё не выявлен тип внутренних перенапряжений, при воздействии которых электрическая прочность этой изоляции минимальна [1].

В случаях использования ограничителей перенапряжений (ОПН) или разрядников, рассчитанных на коммутационные перенапряжения, амплитуды перенапряжений не превышают допустимые для изоляции оборудования значения. В случаях, когда ОПН не применены (сети с напряжением меньше 220 кВ), установленные испытательные амплитуды коммутационных перенапряжений скорректированы с пробивным напряжением разрядников типа РВС [1]. Таким образом, амплитуды внутренних перенапряжений ограничиваются защитными устройствами во всех случаях.

Остаётся не проанализированным только один фактор – форма внутреннего перенапряжения, а с учётом физики переходного процесса, более конкретно – частота свободных колебаний переходного процесса, которая определяется значениями эквивалентных индуктивностей и ёмкости сети для данных конкретных условий.

ТОЭ [21] утверждают, что изменение частоты вынуждающего напряжения может существенно изменить параметры режима любой схемы только в случае наличия в этой схеме индуктивности L и ёмкости C . Для конкретных значений L и C существует частота свободных колебаний:

$$\omega_{\text{св}} = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (1)$$

В случае совпадения частоты вынуждающей ЭДС с частотой свободных колебаний наступает резонанс.

В целом багаж эффективных методов исследований не позволял разработчикам учитывать влияние взаимозависимости параметров сети и оборудования на нормы испытательных напряжений. Именно поэтому в [22] указаны границы применения «от 3 до 500 кВ», а в [2]: «...напряжения 3 кВ и выше».

Упрощенный учет входной емкости трансформатора и емкости между входными и выходными выводами, совместно с неизменными значениями индуктивностей холостого хода и короткого замыкания трансформатора, позволил авторам доклада 12–03 [23] качественно обосновать принципиальную возможность появления в трансформаторе явления внутреннего резонанса. Для изучения явления использовались как расчетные, так и экспериментальные методы.

Резонансные характеристики крупных трансформаторов исследуются с конца 60-х гг. XX столетия. Повреждения трансформаторов сверхвысоких номинальных напряжений (750 кВ) (СВН) связывали с резонансом в обмотках, однако такого рода повреждения сравнительно редки. Тем не менее, если другие процессы нельзя было считать причиной повреждения трансформатора, резонанс рассматривался как возможная причина. В связи с этим проводились обширные исследования явлений в обмотках трансформаторов при различных конфигурациях энергосистемы и при воздействии определенного вида колебательных перенапряжений. Для изучения этих явлений в начале 70-х гг. была создана рабочая группа IEEE (США), а в 1979 г. – РГ 12–07 СИГРЭ, выпустившая отчет 12–14 [23].

Несовершенство применявшихся методов исследования, их большая трудоемкость, отсутствие понятной и четкой программы исследований на перспективу привели к топтанию на одном месте.

В [24] приведены результаты экспериментальных исследований по распределению напряжения частотой 50 Гц вдоль обмотки высокого напряжения (ВН) в режиме холостого хода и короткого замыкания обмотки низкого напряжения (НН). Показано, что в режиме короткого замыкания обмотки НН имеет место перераспределение вынужденной составляющей напряжения обмотки ВН между ее отдельными частями, обусловленное передачей мощности из одной части обмотки ВН в другую часть либо непосредственно, либо с помощью обмотки НН.

Отмечается, что «поле рассеяния трансформатора индуцирует в проводах обмоток э.д.с., под действием которых протекают токи. Эти токи замыкаются внутри отдельных проводов и между параллельными ветвями обмотки и в отличие от токов нагрузки не выходят за пределы обмотки. ...если производится вычисление параметров трансформатора, работающего при повышенных частотах, могут стать необходимыми учет емкости между элементами обмоток и рассмотрение обмоток трансформатора как цепей с распределенными параметрами» [25. С. 139, 194].

По сути, как в [24], так и в [25] рассматривается одно и то же физическое явление только под разными углами зрения. Автора [25] интересуют величины добавочных потерь в обмотках трансформатора, что сказывается, прежде всего, на технико-экономических показателях трансформатора.

Нас же интересуют величины напряжений на частотах обмотки, которые могут быть определяющими для выбора витковой изоляции.

Задача исследований – с помощью экспериментов сформулировать условия, при которых имеющиеся уровни витковой изоляции будут достаточными для надежной эксплуатации трансформатора в электрической сети.

Изложение основных результатов исследования

Детальные исследования проведены на стандартном трансформаторе напряжением 20/0,4 кВ, мощностью 20 кВА с естественным масляным охлаждением. Для возможности проведения запланированного эксперимента трансформатор был реконструирован. Дополнительно на крышку бака были выведены ответвления обмоток ВН (рис. 1). В качестве источника питания, который имитирует свободную составляющую внутренних перенапряжений с изменяющейся частотой, использовался генератор низкочастотных сигналов ГЗ-109. Для измерения напряжений использовались вольтметры типа В7-21А с высоким входным сопротивлением (не менее 8 МОм, входная емкость не более 100 пФ).

Результаты измерения относительных значений напряжений на части обмотки ВН, соответствующих 47 и 53 % ее длины, при действии на обмотку внутренних перенапряжений различной частоты в режиме холостого хода обмотки НН представлены на рис. 2.

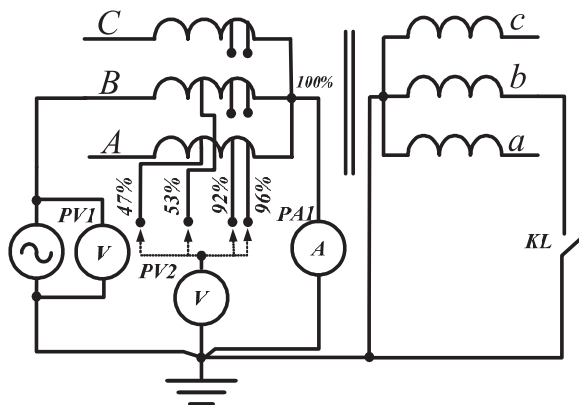


Рис. 1. Схема испытания трансформатора с указанием выводов обмотки ВН, на которых производились измерения

Fig. 1. Circuit of a transformer test including high voltage (HV) winding ends where the measurements were carried out

Из рис. 2 видно, что для частот до 1000 Гц распределение напряжения вдоль обмотки равномерное. При частотах выше 1000 Гц наблюдается плавное уменьшение напряжения на участке обмотки в 47 %, которое на частоте 14000 Гц достигает значения 0,34. Наоборот, на участке обмотки в 53 % имеет место постепенное увеличение напряжения, которое достигает значения 0,73 на частоте 15000 Гц. Начиная с частоты 14000 Гц напряжение на 47 % участке увеличивается и на ча-

стоте 16000 Гц достигает значения 0,74. Начиная с частоты 15000 Гц напряжение на 53 % участке уменьшается и достигает значения 0,28 на частоте 16000 Гц. При частотах более 20000 Гц наблюдается относительная стабилизация распределения напряжения вдоль обмотки. Важно также, что на частоте 15000 Гц сумма напряжений на участках 47 и 53 % в 1,26 раз превышает напряжение источника питания.

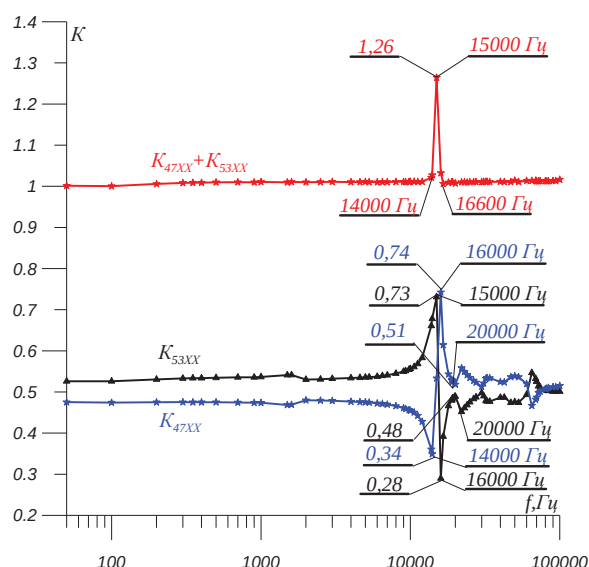


Рис. 2. Относительные значения напряжений K на частях обмотки ВН, соответствующих 47 и 53 % ее длины, при действии на обмотку внутренних перенапряжений различной частоты в режиме холостого хода

Fig. 2. Relative values of voltages K on HV winding parts which correspond to 47 and 53 % of its length affected by open circuit internal over-voltages of different frequencies

Распределение напряжения между участками обмотки ВН 47 и 53 % изменится, если обмотку НН закоротить (рис. 3). Уже при частоте 50 Гц относительное значение напряжения вместо 0,47 для участка 47 % составило величину 0,42, то есть уменьшилось на 10 %, а на участке 53 % составило величину 0,58, то есть увеличилось на 10 %, что важно для витковой изоляции, ибо она в режиме КЗ подвергается воздействию температур, значительно превышающих температуру нормально-го режима.

С увеличением частоты до 15000 Гц значение напряжения на 47 % участке снижается до величины 0,16. В диапазоне частот 15000–16600 Гц напряжение на участке 47 % увеличивается от 0,16 до 0,91, а в диапазоне 16600–30000 Гц эти значения снижаются от 0,91 до 0,51.

На участке 53 % с увеличением частоты до 16600 Гц значения напряжения плавно увеличиваются до величины 1,29, а в диапазоне 16600–18900 Гц резко снижаются до величины 0,29. В диапазоне частот 18900–30000 Гц величина напряжения плавно увеличивается до своего естественного значения.

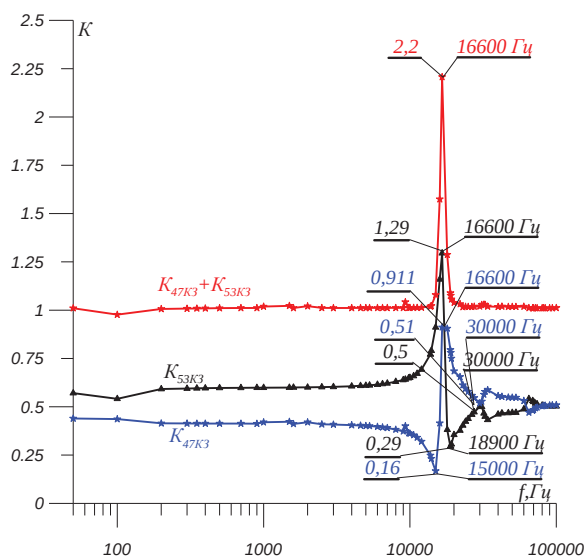


Рис. 3. Относительные значения напряжений K на частях обмотки ВН, соответствующих 47 и 53 % ее длины, при действии на обмотку внутренних перенапряжений различной частоты в режиме короткого замыкания

Fig. 3. Relative values of voltages K on HV winding parts which correspond to 47 and 53 % of its length affected by internal short circuit over-voltages of different frequencies

На рис. 2 и 3 также показана зависимость суммы модулей напряжения на частях обмотки от частоты. Диапазоны частот, в которых эта сумма имеет величину больше единицы, соответствуют ситуации, когда между векторами напряжений имеет место сдвиг по фазе. Величина сдвига легко может быть найдена из соответствующего треугольника напряжений.

Сравнение данных рис. 2 и 3 показывает, что режим работы обмотки НН существенно влияет на результаты опытов. Потому на рис. 4 построено отношение величин напряжения на участках обмотки ВН 47 и 53 % в режиме КЗ обмотки НН к аналогичным величинам в режиме холостого хода обмотки НН.

Как видно из рис. 4, напряжение на участке 47 % в диапазоне частот 50–15000 Гц постепенно уменьшается по отношению к этому же напряже-

нию в режиме холостого хода с величины 0,894 до 0,314. В интервале частот 15000–18000 Гц это напряжение увеличивается до значения 1,66. Затем в диапазоне частот 18000–19000 Гц оно уменьшается до значения 0,613 и начиная с 19000 Гц плавно возвращается к своему естественному значению.

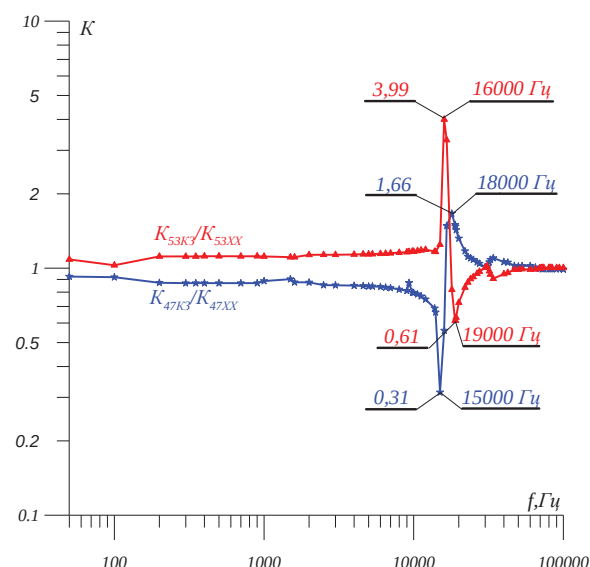


Рис. 4. Отношение величин напряжений K на участках обмотки ВН 47 и 53 % в режиме КЗ обмотки НН к аналогичным величинам в режиме холостого хода обмотки НН

Fig. 4. The ratio of voltages K on HV winding parts 47 and 53 % at LV winding short circuit to the same values at open circuit LV winding

Напряжение на участке 53 % в диапазоне частот 50–16000 Гц плавно увеличивается с величины 1,094 до 3,99, в диапазоне 16000–19000 Гц уменьшается до значения 0,61, а при частотах более 19000 Гц плавно возвращается к своему естественному значению.

Подводя итог количественному исследованию процессов, следует отметить, что с уменьшением длины части обмотки ВН, для которой проводились исследования, относительная кратность пере-

Таблица. Результаты расчетов максимальной относительной кратности перенапряжений на частях обмотки ВН

Table. Results of calculation of maximum signed over-voltage ratio on HV winding parts

Диапазон частот, Гц Frequency range, Hz	Часть обмотки ВН, % HV winding part, %	4	8	44	47	53	56	92	96
16400–18000	Холостой ход Open circuit	2,8	2,4	2,24	1,57	1,37	1,63	1,1	0,97
	Короткое замыкание Short circuit	5,51	4,63	4,1	1,93	2,44	3,24	1,18	1,094
27500–34000	Холостой ход Open circuit	1,14	1,41	0,85	1,136	0,93	1,14	1,118	0,93
	Короткое замыкание Short circuit	1,7	1,94	0,85	1,24	0,94	1,23	1,15	1,079
70000–77000	Холостой ход Open circuit	1,53	1,13	0,91	1,066	0,96	1,124	1,039	0,92
	Короткое замыкание Short circuit	1,47	1,095	0,85	1,049	0,97	1,129	1,017	1,009

напряжения увеличивается (по отношению к номинальному напряжению части обмотки). Результаты расчетов максимальной относительной кратности перенапряжений приведены в таблице.

Как видно из таблицы, существуют три диапазона опасных частот 14600–18000, 27500–34000 и 70000–77000 Гц, при которых величины перенапряжений максимальны.

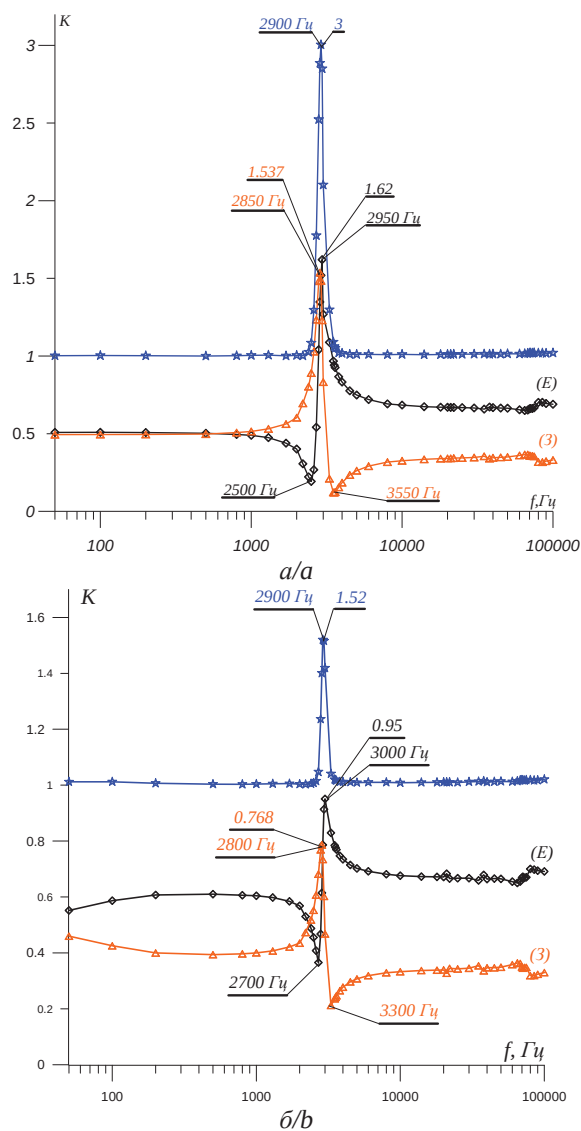


Рис. 5. Относительные значения напряжения K на частях обмотки ВН, соответствующие 50 % от начала и 50 % от конца ее длины, при действии на обмотку трансформатора напряжения типа НОМ-10 внутренних перенапряжений различной частоты в режиме: а) холостого хода; б) КЗ обмотки НН

Fig. 5. Relative values of voltage K on HV winding parts. The values correspond to 50 % from the beginning and 50 % from the end of its length. The NOM-10 type voltage transformer winding is affected by internal over-voltages of different frequencies: a) open circuit; b) short circuit LV winding

Другой, не известной ранее, особенностью процессов является перераспределение напряжений на частях обмотки в зависимости от частоты при-

ложенного напряжения и режима работы обмотки НН (рис. 4, 5), что приводит к перенапряжениям на отдельных элементах обмотки и, по-видимому, потребует увеличения уровня изоляции всей обмотки, а не отдельной какой-либо ее части.

Описанные процессы присущи любому электрооборудованию с обмотками ВН. В зависимости от параметров обмотки и состояния изоляции меняться будут значения резонансных частот и кратностей перенапряжений. В качестве иллюстрации этого положения на рис. 5 приведены относительные значения напряжений на частях обмотки ВН трансформатора напряжения типа НОМ-10. В этом случае резонансная частота составила 2900 Гц, а перенапряжения в режиме холостого хода обмотки НН превысили значения перенапряжений в режиме КЗ обмотки НН.

Разновидность внутреннего резонанса между частями обмотки предполагает, что результирующие сопротивления двух разных частей обмотки имеют разный характер. Одна часть обмотки – индуктивность. Вторая часть – емкость. При частоте, на которой индуктивное сопротивление одной части обмотки равно емкостному сопротивлению другой части, наступает резонанс напряжений.

Для формулирования условий возникновения резонанса необходимо изучить свойства каждой части обмотки, а также учесть наличие взаимной индукции между частями обмотки. Если в обмотке ВН выделить какую-либо ее часть и для этой части построить частотную характеристику как отношение значения приложенного напряжения источника к значению тока на выходе из обмотки, то такая характеристика будет иметь ряд чередующихся максимумов и минимумов (рис. 6, 7). На рисунках в индексах при Z указаны соответствующие сопротивлениям части обмотки ВН в процентах. Максимум характеристики соответствует «резонансу токов», а минимум – «резонансу напряжений».

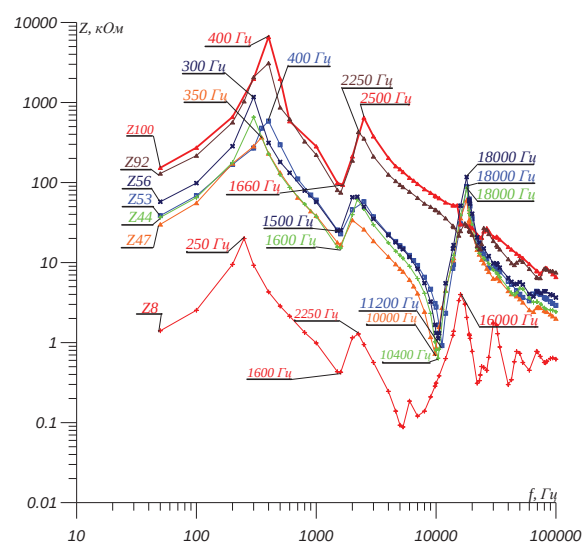


Рис. 6. Частотные характеристики частей обмотки ВН трансформатора для режима холостого хода обмотки НН

Fig. 6. Frequency characteristics of HV winding parts in transformer for open circuit LV winding

Как видно из рис. 6, 7, резонансные частоты характеристик отдельных частей обмотки не совпадают между собой. Важно, что сопротивление части может быть большим, чем сопротивление всей обмотки. Так, на частоте 18000 Гц (рис. 6) значения модулей сопротивлений $Z_{56}=117,1$; $Z_{44}=85,45$; $Z_{47}=60$; $Z_{53}=89,34$ кОм. Для рис. 7 соответственно на частоте 20000 Гц $Z_{56}=144,74$, $Z_{44}=84,28$ кОм и на частоте 19200 Гц $Z_{47}=66,9$, $Z_{53}=70,31$ кОм. При этом сопротивление всей обмотки Z_{100} для опыта на рис. 6 составило 29,22 кОм, а для опыта на рис. 7 – 29,81 кОм.

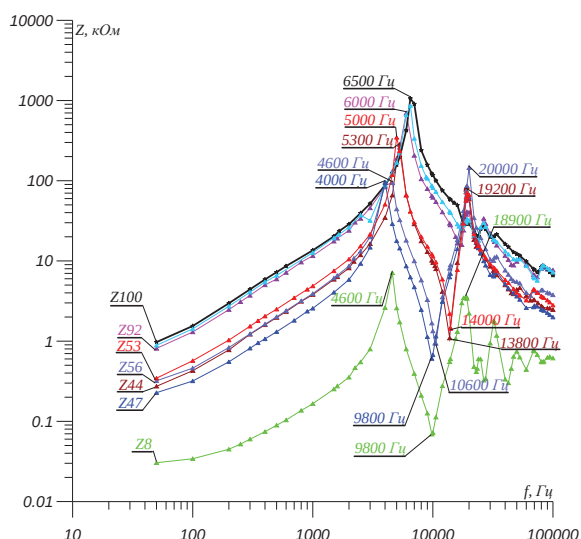


Рис. 7. Частотные характеристики частей обмотки ВН трансформатора для режима короткого замыкания обмотки НН

Fig. 7. Frequency characteristics of HV winding parts in transformer for short circuit LV winding

По мере уменьшения длины части обмотки, на которую подано напряжение, увеличивается относительно и интенсивность колебаний на высоких частотах, которые в характеристиках 100 или 92 % части были практически подавлены.

Для количественной оценки резонансных явлений необходимо таким образом организовать эксперимент, чтобы имелась возможность учесть явления взаимоиндукции между такими частями обмотки, которые вместе составляют целую обмотку. Соответствующие результаты измерения сопротивлений частей обмотки 4 и 96, 8 и 92, 44 и 56, 53 и 47 % при подаче напряжения на всю (100 %) обмотку как в режиме холостого хода обмотки НН, так и в режиме ее КЗ приведены на рис. 8–10.

Как известно, модели отдельных частей обмотки, которые в сумме представляют модель всей обмотки, могут быть представлены в виде суммы двухполюсников, каждый из которых состоит из параллельно включенных элементов R , L , C . Количество таких двухполюсников определяется количеством частот, на которых развивается резонанс токов для данной обмотки в заданном режиме работы трансформатора (рис. 11), а взаимное влияние между частями обмотки учитывается наличием взаимоиндукций $M_{11-12}...M_{11-j2}$. Параметры модели рис. 11 зависят от режима работы других обмоток

трансформатора. Их количественное определение связано с необходимостью преодоления значительных экспериментальных и расчетных сложностей. В [24] изложены методы моделирования, которые позволяют в неявном виде учесть наличие взаимоиנדуктивностей и решить эти задачи. Но для качественного анализа процессов модель рис. 11 более предпочтительна. Несовпадение резонансных частот частей обмотки (рис. 6, 7) обусловлено разными законами изменения собственной индуктивности и продольной емкости от длины части обмотки. Если на начальном этапе исследований пренебречь наличием взаимоиндуктивности, то несовпадение резонансных частот частей обмотки должно привести к перераспределению приложенного к обмотке напряжения между ее отдельными частями в широком диапазоне частот. Таким образом, на одних частях обмотки напряжение окажется больше, а на других меньше, чем при равномерном распределении, что витковая изоляция соответствующей части обмотки воспринимает как появление перенапряжений. Учет взаимоиндукции приводит к изменению частот, на которых наблюдается резонанс токов для отдельных частей обмотки. Так, для вариантов деления обмотки на части, соответствующие 53 и 47 и 56 и 44 % вместо частот 400, 350, и 300 Гц (рис. 6) получили частоту 400 Гц (рис. 8, 9). Вместо частот 5000 и 4000 Гц (рис. 7) соответственно получена частота 6500 Гц (первый вариант) и 7000 Гц (второй вариант) (рис. 8, 9). При неизменных значениях продольных емкостей модели (рис. 11) увеличение резонансных частот из-за влияния взаимоиндукции означает уменьшение эквивалентных индуктивностей двухполюсников модели (рис. 11). Степень этого уменьшения для разных частей обмотки разная, что не исключает, а только несколько корректирует степень перераспределения напряжения между частями обмотки.

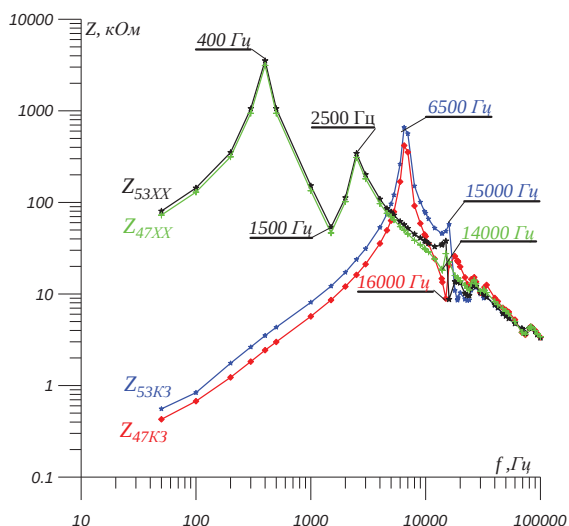


Рис. 8. Зависимость от частоты сопротивлений 47 и 53 % частей обмотки при подаче напряжения на всю (100 %) обмотку

Fig. 8. Dependence of 47 and 53 % winding parts at voltage supply to the whole (100 %) winding on resistance frequency

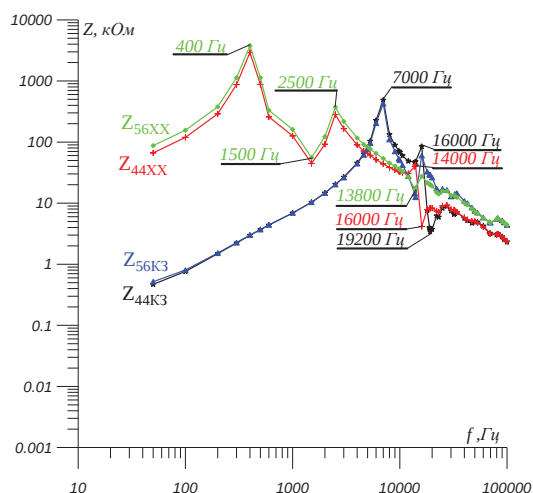


Рис. 9. Зависимость от частоты сопротивлений 56 и 44 % частей обмотки при подаче напряжения на всю (100 %) обмотку

Fig. 9. Dependence of 56 and 44 % winding parts at voltage supply to the whole (100 %) winding on resistance frequency

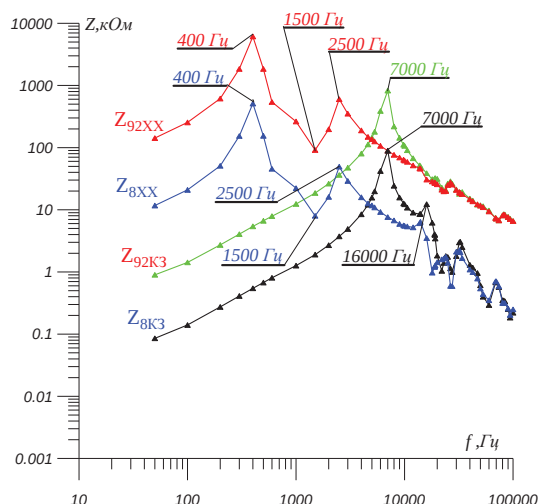


Рис. 10. Зависимость от частоты сопротивлений 92 и 8 % частей обмотки при подаче напряжения на всю (100 %) обмотку

Fig. 10. Dependence of 92 and 8 % winding parts at voltage supply to the whole (100 %) winding on resistance frequency

Как видно из сравнения рис. 8–10 и рис. 6, 7, наличие взаимной индукции между частями общей обмотки обеспечило существенно большую «синхронизацию» частот экстремумов функций. Качественные изменения произошли в диапазоне частот 14000–18000 Гц. Обращает внимание изменение формы характеристик вблизи минимума на частоте 14000 Гц и практическое совмещение всех характеристик в одну, в диапазоне частот 16000–20000 Гц. Особая форма характеристик вблизи минимума функции на частоте 14000 Гц коррелируется с относительно плавным нарастанием перенапряжений на элементах обмотки. Особенностью резонансного процесса внутри обмотки является то, что резонанс имеет место не между индуктивностью одной части обмотки и геометрической емкостью другой части, а между эквивалентными сопротивлениями частей обмотки. При подаче напряжения на обмотку ВН возникает сквозной ток через обмотку, который обуславливает, благодаря явлению взаимной индукции, появление в частях обмотки уравнивающих токов. В результате вместо эквивалентных сопротивлений частей обмотки на рис. 6, 7 мы получили эквивалентные сопротивления частей обмотки на рис. 8–10.

Распределение перенапряжений между сопротивлениями частей обмоток (рис. 8–10) в относительных номинальных единицах в зависимости от частоты приложенного напряжения для разных режимов работы обмотки НН трансформатора показано на рис. 12. Как видно из рис. 12, обмотка ВН трансформатора имеет несколько диапазонов частот (15000–18000, 25000–30000, 70000–80000 Гц), в пределах которых возможен резонанс напряжений.

В общем случае суммарный магнитный поток можно разложить на две составляющие – основной магнитный поток и поток рассеяния. Составляющая напряжения, обусловленная основным магнитным потоком, распределяется равномерно вдоль обмотки. Составляющая напряжения, обусловленная потоком рассеяния, зависит от величины и характера уравнивающих потоков мощности, которые циркулируют на данном участке обмотки ВН. В зависимости от соотношения составляющих суммарного магнитного потока для конкретного участка обмотки ВН меняется величина результирующего напряжения на этом участке.

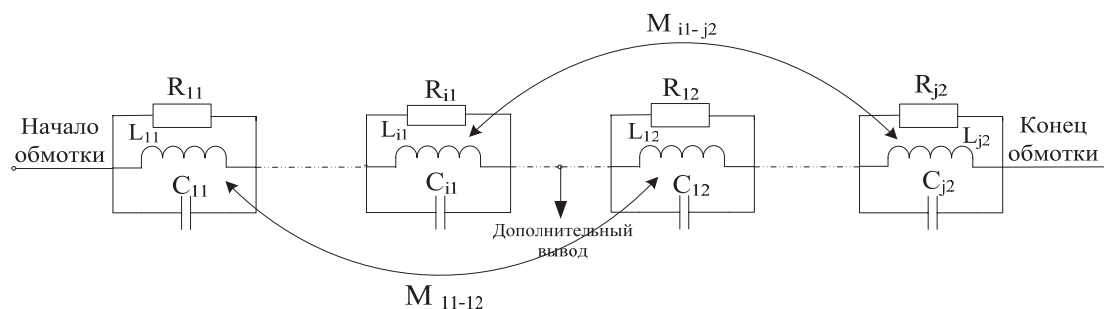


Рис. 11. Модель обмотки ВН с дополнительным выводом для заданного режима работы трансформатора

Fig. 11. Model of HV winding with additional terminal for the predetermined operation mode of the transformer

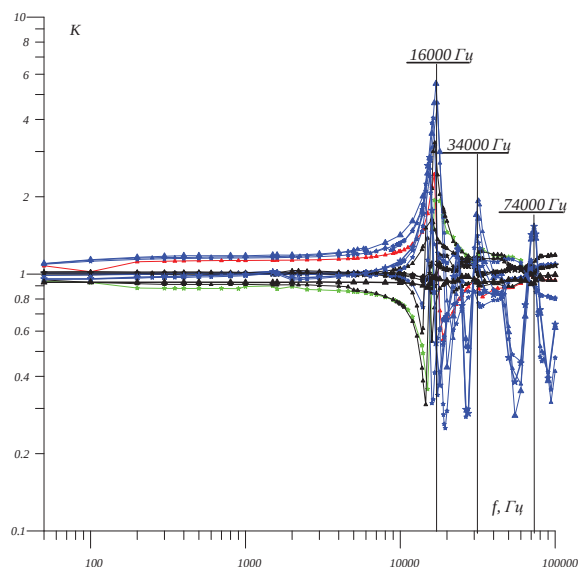


Рис. 12. Распределение перенапряжений между сопротивлениями разных частей обмоток в относительных номинальных единицах в зависимости от частоты приложенного напряжения для разных режимов работы обмотки НН трансформатора

Fig. 12. Over-voltage distribution between resistances of winding different parts in relative nominal units depending on frequency of the applied voltage for different operation modes of the transformer LV winding

Всё многообразие вышеописанных ситуаций можно разделить на три характерные группы.

К первой группе следует отнести режимы, при которых сумма модулей результирующих сопротивлений частей обмотки равна модулю результирующего сопротивления всей обмотки (рис. 6, 7). В этом случае сопротивление частей и всей обмотки определяется исключительно основным магнитным потоком. Для этой группы режимов распределение напряжения вдоль обмотки линейно.

Ко второй группе следует отнести режимы, при которых сумма модулей результирующих сопротивлений частей обмотки меньше модуля результирующего сопротивления всей обмотки. В этом случае, за счет наличия взаимной индуктивности между частями обмотки, возникает перераспределение напряжений между частями обмотки в широком диапазоне частот. При этом напряжения на частях обмотки совпадают по фазе, а их сумма равна приложенному напряжению.

К третьей группе следует отнести режимы, при которых сумма модулей результирующего сопротивления частей обмотки больше величины результирующего сопротивления. При этом напряжения на частях обмотки не совпадают по фазе. Наступает резонанс напряжений.

Подводя итоги качественному исследованию электромагнитных процессов в обмотках трансформатора, следует сделать вывод, что существует два независимых, взаимно дополняющих друг друга процесса. Первый процесс связан с разными резонансными частотами, при которых наступает резонанс токов дополняющих частей и всей обмот-

ки (рис. 6, 7). Если частота резонанса токов части обмотки наступает раньше частоты резонанса токов для всей обмотки, то происходит процесс перераспределения величины напряжения между частями обмотки при неизменной величине напряжения на всей обмотке. Неизменное по величине напряжение на всей обмотке обуславливает неизменное значение сквозного тока. При неизменном значении тока увеличение сопротивления части обмотки приводит к соответствующему росту напряжения на части обмотки, и наоборот, уменьшение сопротивления другой части обмотки приводит к уменьшению напряжения на этой другой части. Этот процесс характерен для разных частей обмотки во всем диапазоне частот свободной составляющей внутренних перенапряжений: от 50 до 100000 Гц, и может быть причиной витковых замыканий в обмотке. Таким образом, резонанс токов в части обмотки – причина появления перенапряжений на этой части.

Второй процесс – резонанс напряжений, который появляется в строго ограниченном узком диапазоне частот.

Выводы

Впервые установлено, что резонансные перенапряжения в частях обмотки – основная причина витковых замыканий обмоток трансформаторов при действии на них со стороны сети внутренних перенапряжений.

Усиление продольной изоляции обмотки даст возможность повысить надежность работы трансформаторов.

Резонанс токов в дополняющих частях обмотки обуславливает появление перенапряжений на этих частях в диапазоне частот от 50 до 100000 Гц. Частота свободной составляющей перенапряжений сети определяет конструкцию части обмотки, для которой перенапряжения будут максимальны.

Резонанс напряжений между дополняющими частями обмотки обуславливает появление более значительных кратностей перенапряжений, но в строго определенном узком диапазоне частот.

Каждая обмотка ВН любого трансформатора имеет несколько диапазонов резонансных частот.

Главный вывод исследований: кроме классического вида внутреннего резонанса напряжений между индуктивностью обмотки и емкостью изоляции на дискретной частоте установлен факт существования резонансов между конструктивно идентичными частями обмотки ВН в варианте резонанса токов, существующего в широком диапазоне частот, и варианте резонанса напряжения, существующего в нескольких дискретных диапазонах частот.

При появлении любых перенапряжений со стороны сети внутри трансформатора всегда развиваются перенапряжения, которые принципиально будут иметь значения больше, чем приложенные.

Важно, что ни один директивный документ в Мире не учитывает это массовое явление!

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сапожников А.В. Уровни изоляции электрооборудования высокого напряжения. Нормы и методы испытания электрической прочности. – М.: Энергия, 1969. – 296 с.
2. ГОСТ 1516.2–97. Межгосударственный стандарт, Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение 3 кВ и выше, Общие методы испытаний электрической прочности изоляции. – Киев: Госстандарт Украины, 1999. – 32 с.
3. ГОСТ 1516.3–96. Межгосударственный стандарт, электрооборудование переменного тока на напряжение от 1 до 750 кВ. Требования к электрической прочности изоляции. – Киев: Госстандарт Украины, 1999. – 54 с.
4. Ганус А.И., Старков К.А. Повреждаемость трансформаторов напряжения в областных электрических сетях АК «Харьковоблэнерго» и мероприятия по ее снижению // Світлотехніка і електроенергетика. – 2003. – № 1. – С. 76–81.
5. Ахметшин Р.С., Рыбаков Л.М. Технические средства диагностирования силовых трансформаторов 10/0,4 кВ на основе частотных характеристик // Электричество. – 2005. – № 5. – С. 20–26.
6. Лейтес Л.В., Пинцов А.М. Схемы замещения многообмоточных трансформаторов. – М.: Энергия, 1974. – 192 с.
7. Математичне моделювання в електроенергетиці: підручник / О.В. Кириленко, М.С. Сегеда, О.Ф. Буткевич, Т.А. Мазур. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2010. – 608 с.
8. Техника высоких напряжений / Л.Ф. Дмоховская, В.П. Ларионова, Ю.С. Пинталь, Д.В. Разевиг, Е.Я. Рябова / под общ. ред. Д.В. Разевига. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Энергия, 1976. – 488 с.
9. Сегеда М.С., Черемних Є.В., Мазур Т.А. Математичне моделювання вільних коливань напруги в обмотках трансформаторів з урахуванням взаємодії між витками під час імпульсних перенапруг // Дніпропетровськ Науковий вісник НГУ. – 2013. – № 1. – С. 68–76.
10. Рабочие группы А2/А3/В3.21. Электрическая среда трансформаторов. Влияние переходных процессов // ELECTRA 218. – Paris, February 2005. – Paris: CIGRE, 2005. – С. 12–26.
11. Руководство по защите электрических сетей 6–1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений. РД 153-34.3-35.125-99. Изд. 2-е, утверждено Первым заместителем председателя Правления РАО «ЕЭС России» О.В. Бритвиным 12.07.1999 г. – СПб.: ПЭИПК, 1999. – 333 с.
12. Правила устройства электроустановок. 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 640 с.
13. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей и правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей. – М.: Министерство Энергетики и Электрификации СССР, 1969. – 352 с.
14. Половой И.Ф., Михайлов Ю.А., Халилов Ф.Х. Перенапряжения на электрооборудовании высокого и сверхвысокого напряжения. – Л.: Энергия, 1975. – 255 с.
15. Техника высоких напряжений / под общ. ред. д.т.н. проф. Г.С. Кучинского. – СПб.: Петербургский энергетический институт повышения квалификации Министерства топлива и энергетики Российской Федерации, 1998. – 699 с.
16. Долгинов А.И. Перенапряжения в электрических системах. – М.; Л.: ГЭИ, 1962. – 512 с.
17. Руденберг Р. Переходные процессы в электроэнергетических системах. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1955. – 714 с.
18. Артемьев Д.Е., Тиходеев Н.Н., Шур С.С. Статистические основы выбора изоляции линий электропередачи, коммутационные перенапряжения и электрические характеристики изоляции // под ред. Н.Н. Щедрина. – М.; Л.: Энергия, 1965. – 376 с.
19. Артемьев Д.Е., Тиходеев Н.Н., Шур С.С. Координация изоляции линий электропередачи. Статистические принципы координации уровней изоляции ЛЭП высших классов напряжения // под ред. Н.Н. Щедрина. – М.; Л.: Энергия, 1966. – 282 с.
20. Дмоховская Л.Ф. Инженерные расчеты внутренних перенапряжений в электропередачах. – М.: Энергия, 1972. – 288 с.
21. Теоретические основы электротехники. Т. 1. Основы теории линейных цепей / под ред. проф. П.А. Ионкина. – М.: Высшая школа, 1976. – 544 с.
22. ГОСТ 1516.1–76*. Электрооборудование переменного тока на напряжение от 3 до 500 кВ. Требования к электрической прочности изоляции. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1999. – 61 с.
23. Энергетика за рубежом. Трансформаторы. Перенапряжения и координация изоляции. Переводы докладов международной конференции по большим электрическим системам (СИГРЭ-84) / под ред С.Д. Лизунова, А.К. Лоханина. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 420 с.
24. Физические явления внутреннего резонанса в электрооборудовании с обмотками высокого напряжения: Монография / И.Р. Бучковский, М.М. Молнар, А.Л. Никонец, Л.А. Никонец, М.Б. Сабат / под ред. д.т.н. проф. Л.А. Никонца. – Львов: Друк НВФ «Українські технології», 2012. – 166 с.
25. Васютинский С.Б. Вопросы теории и расчета трансформаторов. – Л.: Энергия, 1970. – 432 с.

Поступила 17.03.2014 г.

UDC 621.3.013.62; 621.314.21; 621.314.222.8

ELECTROMAGNETIC PROCESSES AND CONDITIONS OF OCCURRING RESONANCE OVERVOLTAGE IN POWER TRANSFORMER WINDINGS

Myroslav B. Sabat,

National University «Lviv Polytechnic», 12, St. Bandery Street, Lviv,
79013, Ukraine. E-mail: myroslav003@gmail.com

Aleksey L. Nykonets,

National University «Lviv Polytechnic», 12, St. Bandery Street, Lviv,
79013, Ukraine. E-mail: nykonets@gmail.com.

Vladimir P. Venger,

National University «Lviv Polytechnic», 12, St. Bandery Street, Lviv,
79013, Ukraine. E-mail: vol.venher@gmail.com

Viktor P. Venger,

National University «Lviv Polytechnic», 12, St. Bandery Street, Lviv,
79013, Ukraine. E-mail: venherviktor@gmail.com

The relevance of the study. At the present stage of CIS countries network development the problem of increasing the operation reliability of transformers, which main part has been already out of date is of the first-priority. The problem is also up to date for designing, testing and producing new transformers.

The main aim of the study is to state, using the experimental research, the terms, when the existing levels of turn insulation are not sufficient for reliable transformer operation in the electrical network.

The methods used in the study: frequency methods of natural experiment and electrical circuit analysis.

The results. For the first time it has been stated that resonance overvoltage in winding parts causes turn faults in transformer windings, while they are influenced by power system inner overvoltage. Making the longitudinal insulation of a winding stronger gives a possibility to increase operation reliability of the transformer. As an alternative, there is a possibility to develop actions for network, which eliminate dangerous impacts on specific frequencies.

Conclusions. Besides the classical type of internal voltage resonance between winding inductance and insulation capacitance, resonances between constructively-identical parts of high voltage winding were established. They exist in a wide frequency range in terms of current resonance and in a few discrete frequency ranges, in terms of voltage resonance. For the first time the mechanism of overvoltage appearance between the parts of transformer windings has been stated – the resonance between mutual induction voltages of winding parts is caused by energy exchange between the winding parts on the ways of magnetic flux beyond the magnetic core. Overvoltage, which values are fundamentally higher, than the applied ones, occurs inside a transformer as any network overvoltage appear.

Key words:

Transformer, resonance overvoltage, electromagnetic processes, longitudinal insulation, frequency research method.

REFERENCES

1. Sapozhnikov A.V. *Urovni izolyatsii elektrooborudovaniya vysokogo napryazheniya. Normy i metody ispytaniya elektricheskoy prochnosti* [Insulation levels of high-voltage electrical equipment. Standards and methods of electric strength test]. Moscow, Energiya Publ., 1969. 296 p. книга
2. GOST 1516.2-97. *Electrooborudovanie i electroustanovki peremennogo toka na napryazhenie 3 kV i vyshe* [State Standard 1516.2-97. Interstate standard, AC electrical equipment and installations with rated voltage 3 kV and higher. Main test methods of electrical strength of insulation]. Kiev, State standard of Ukraine, 1999. 32 p.
3. GOST 1516.3-96. *Mezhhgosudarstvenny standart, elektrooborudovanie peremennogo toka na napryazhenie ot 1 do 750 kV* [Interstate standard, alternative current electrical equipment with rated voltage from 1 to 750 kV. Insulation electrical strength requirements]. Kiev, State standard of Ukraine, 1999. 54 p.
4. Ganus A.I., Starkov K.A. *Povrezhdaemost transformatorov napryazheniya v oblastnykh elektricheskikh setyah AK «Kharkovoblenergo» i meropriyatiya po ee ispytaniyu* [Voltage transformer damaging in local power networks of «Kharkovoblenergo» and its reducing measures]. *Lighting technology and electrical power engineering*, 2003, no. 1, pp. 76–81.
5. Akhmetshin R.S., Rybakov L.M. *Tekhnicheskie sredstva diagnostirovaniya silovykh transformatorov 10/0,4 kV na osnove chastotnykh kharakteristik* [Technical tools for diagnosing 10/0,4 kV power transformers based on frequency characteristic]. *Elektrichestvo*, 2005, no. 5, pp. 20–26.
6. Leytes L., Pintsov A. *Skhemy zameshcheniya mnogoobmotochnykh transformatorov* [Equivalent circuits of multiwinding transformers]. Moscow, Energiya Publ., 1974. 192 p.
7. Kirilenko O.V., Segeda M.S., Butkevich O.F., Mazur T.A. *Matematichne modelyuvannya v elektroenergetyky* [Mathematical modelling in power engineering]. Lviv: National university «Lviv Polytechnic» Press., 2010. 608p.
8. Dmukhovskaya L., Larionova V., Pintal Yu., Razevig D., Rybkova. *Tekhnika vysokikh napryazhenii* [High-voltage engineering]. Moscow, Energiya Publ., 1976. 2nd ed., revised and updated. 488 p.
9. Segeda M.S., Cheremnyh E.V., Mazur T.A. *Matematichne modelyuvannya vilnykh kolyvan napruhy v obmotkakh transformatoriv z uralhuvannyam vzaimoindukcii mizh vytkamy pid chas impulsnykh perenaprug* [Mathematical modelling of voltage free oscillation in transformer windings taking into consideration mutual induction between turns under the influence of impulse overvoltage]. *Dnepropetrovsk Scientific bulletin of NGU*, 2013, no. 1, pp. 68–76.

10. *Rabochie gruppy A2/A3/B3.21. Elektricheskaya sreda transformatorov. Vliyaniye perekhodnykh protsessov* [CIGRE working group A2-A3-B3.21. Electrical Environment of Transformers. Impact of fast transients]. ELECTRA 218. Paris, February 2005. Paris, CIGRE, 2005. pp. 12–26.
11. *Rukovodstvo po zashchite elektricheskikh setey 6–1150 kV ot grozovykh i vnutrennikh perenapryazheniy* [Manual on 6–1150 kV electrical network protection against lightning and internal overvoltage]. RD 153–34.3–35.125–99. 2nd ed., 12.07.1999. St-Petersburg, PEIPK Publ. house, 1999. 333 p.
12. *Pravila ustroystva elektroustanovok* [The rules of electrical equipment setup]. 6th ed., revised and updated. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1985. 640 p.
13. *Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii elektroustanovok potrebiteley i pravila tekhniki bezopasnosti pri ekspluatatsii elektroustanovok potrebiteley* [Regulations of technical maintenance of consumer electrical equipment and safety standards of consumer electrical equipment maintenance]. Moscow, Department of Energy and Electrification of USSR, 1969. 352 p.
14. Polovoy I.F., Mikhaylov Yu.A., Khalilov F.Kh. *Perenapryazheniya na elektrooborudovanii vysokogo i sverkhvysokogo napryazheniya* [Overvoltage on high- and ultrahigh voltage electrical equipment]. Leningrad, Energiya Publ., 1975. 255 p.
15. *Tekhnika vysokikh napryazheniy* [High-voltage engineering]. Ed. by G. Kuchinskiy. St-Petersburg, St. Petersburg electrical engineering advanced training institute of the department of fuel and energy of Russian Federation, 1998. 699 p.
16. Dolginov A.I. *Perenapryazheniya v elektricheskikh sistemakh* [Overvoltage in electrical systems]. Moscow; Leningrad, GEL Press, 1962. 512 p.
17. Ryudenberg R. *Perekhodnye processy v elektroenergeticheskikh sistemakh* [Transient processes in electrical systems]. Moscow, Foreign literature publishing house, 1955. 714 p.
18. Artemyev D., Tikhodeev N., Shur S. *Statisticheskie osnovy vybora izolyatsii liniy elektropredachi, kommutatsionnye perenapryazheniya i elektricheskie kharakteristiki izolyatsii* [Statistic fundamentals of power line insulation selection, commutation overvoltage and electrical characteristics of the insulation]. Ed. by N. Shchedrin. Moscow; Leningrad, Energiya, 1965. 376 p.
19. Artemyev D., Tikhodeev N., Shur S. *Koordinatsiya izolyatsii liniy elektropredachi. Statisticheskie printsipy koordinatsii urovney izolyatsii LEP vysshikh klassov napryazheniya* [Power line insulation coordination, statistic principles of insulation level coordination of the highest voltage class power line]. Ed. by N. Shchedrin. Moscow; Leningrad, Energiya publ., 1966. 282 p.
20. Dmikhovskaya L. *Inzhenernye raschety vnutrennikh perenapryazheniy v elektropredachakh* [Engineering calculations of internal overvoltage in electricity transmission]. Moscow, Energiya Publ., 1972. 288 p.
21. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki. Osnovy teorii lineynykh tsepey* [Theory of electrotechnology. The basis of linear circuit theory]. Ed. by P. Ionkin. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1976. Vol. 1, 544 p.
22. GOST 1516.1–76* *Electrooborudovanie peremennogo toka na napryazhenie ot 3 do 500 kV. Trebovaniya k elektricheskoy prochnosti izolyatsii* [State Standard 1516.1–76*. Alternative current electrical equipment with rated voltage from 3 to 500 kV. Insulation electrical strength requirements]. Moscow, IPK Press, 1985. 61 p.
23. *Energetika za rubezhom. Transformatory. Perenapryazheniya i koordinatsiya izolyatsii. Perevody dokladov mezhdunarodnoy konferentsii po bolshym elektricheskim sistemam* [CIGRE-84. Power engineering abroad. Transformers. Overvoltage and insulation management. Translations of international conference reports of big electrical systems]. Eds. S. Lizunov, A. Lokhanin. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986. 420 p.
24. Buchkovsky I., Molnar M., Nikonets A., Nikonets L., Sabat M. *Fizicheskie yavleniya vnutrennego rezonansa v elektrooborudovanii s obmotkami vysokogo napryazheniya* [Physical phenomenon of internal resonance in electrical equipment with high voltage windings]. Ed. by Nikonets L. Lviv, Ukrainian technologies Press., 2012. 166 p.
25. Vasyutinsky S. *Voprosy teorii i rascheta transformatorov* [Problems of transformer theory and computation]. Leningrad, Energiya Publ., 1970. 432 p.

Received: 14 March 2014.