

УДК 621.3.013.62; 621.314.21; 621.314.222.8

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЕ ПРОИЗВОДСТВО И ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ ГЕОРЕСУРСОВ

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: Электроэнергия – один из важнейших ресурсов в мире, используемый повсеместно и приводящий в движение другие отрасли промышленности. Передача электроэнергии от места ее производства до места ее потребления, как один из основополагающих принципов процесса мирового электроснабжения, делается возможной в результате преобразований ее параметров, осуществляемых трансформаторами. При обосновании требуемых уровней продольной (витковой) изоляции трансформаторов явление внутреннего резонанса не учитывалось ни одним директивным документом в мире. Изучение этого явления и рекомендации, которые могут быть сформулированы, позволят повысить надежность работы трансформаторов.

Цель работы: изучение особенностей проявления явления внутреннего резонанса при действии перенапряжений сети одновременно на группу обмоток трансформатора.

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

Результаты. Важной, ранее неизвестной особенностью процессов при внутреннем резонансе является неравномерность распределения напряжения вдоль обмоток. Резонансные частоты процессов, которые наблюдаются в элементах трансформатора, зависят не только от параметров трансформатора, но и от параметров сети, в которую этот трансформатор отдает энергию. Резонансные частоты процессов в обмотках низкого напряжения отличаются от резонансных частот процессов между обмотками высокого напряжения и внутри обмотки высокого напряжения. Различается также интенсивность резонансных процессов, что приводит к существенно разным кратностям перенапряжений. При действии перенапряжений одновременно на группу обмоток может возникнуть не только резонанс между напряжениями взаимоиנדукции частей одной обмотки, но и резонанс между напряжениями взаимоиנדукции одинаковых обмоток разных фаз.

Ключевые слова:

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

Анализ результатов исследования по изучению явлений внутреннего резонанса

Методология любого исследования должна быть адекватна сути проблемы. Предмет нашего исследования – трансформатор, самый распространенный в мире элемент, с помощью которого производится преобразование электроэнергии в местах ее производства и в местах ее потребления, – объект с распределенными параметрами, у которого между продольными элементами обмоток и между обмотками разных фаз существует явление взаимоиנדукции. По сути, исследование электромагнитных процессов в трансформаторе – задача по определению параметров электромагнитного поля, существующего в средах с различными электрическими свойствами, на границах которых должны выполняться определенные условия (граничные условия) [1]. Сложность количественного ма-

тематического описания процессов требовала упрощения первоначальной, подлежащей решению, физической задачи.

Применительно к промышленным трансформаторам упрощение было достигнуто за счет отдельного рассмотрения магнитных и электрических полей, что, как следствие, привело к разработке теории расчета полей рассеяния [2] и методов выбора их изоляции [3–7]. Эти методы не привели к повышению надежности работы трансформаторов, но, до определенного этапа, считались приемлемыми, так как с применением метода проб и ошибок все же давали результат, удовлетворявший практику. Ситуация изменилась, когда возникла практическая необходимость создания сверхмощных трансформаторов на сверхвысокие напряжения, повреждения которых уже не могли быть экономически приемлемыми.

Резонансные характеристики крупных трансформаторов исследуются с конца 60-х гг. XX столетия. 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 [8].

Возрастающее количество повреждений изоляции в трансформаторах в последние годы мотивировало СИГРЭ инициировать (в 2008 г.) новую рабочую группу (A2/C4. 39), чья сфера деятельности включает оценку типов электрических переходных взаимодействий между трансформатором и сетью.

Исследования под эгидой СИГРЭ продолжают и в настоящее время [9, 10]. Исследован дополнительно один из возможных источников резонансного возбуждения обмоток – быстрые переходные процессы (до нескольких МГц) в элегазовых подстанциях. Последние публикации продолжают наметившуюся тенденцию детального учета геометрического описания конструкции трансформатора. Так как эта информация – собственность производителя, делается вывод о сложности такого анализа. Как альтернативный подход предлагается использовать модели трансформатора в виде «черного (серого) ящика», так как они не требуют информации о геометрии трансформатора и способны воспроизводить поведение трансформатора с высокой степенью точности. Модели в виде «черного ящика» обычно получают с помощью снятия частотных характеристик с последующей аппроксимацией снятых функций. Такие модели могут быть реализованы с помощью программ моделирования электромагнитных переходных процессов через обобщенную электрическую схему или с помощью численного интегрирования уравнений состояния [11–15].

Подводя итоги обзора выполненных исследований, следует констатировать, что более чем за 50 лет исследований ученым всего мира не удалось сформулировать предложений по корректировке методов изготовления и высоковольтных испытаний продольной изоляции трансформаторов, обеспечивающих надежную эксплуатацию трансформаторов в условиях развития в обмотках резонансных явлений. Единственная причина – несоответствие используемых наукой методов исследования существу исследуемой проблемы. Без понимания физических процессов, которые происходят в обмотках и изоляции трансформатора, невозможно правильно выбрать методы исследования, а следовательно, и разработать рекомендации по повышению надежности работы.

С 2005 г. начинаются исследования внутреннего резонанса на Украине [16]. Предлагаются конкретные способы неразрушающей диагностики предаварийного состояния электрооборудования с

обмотками высокого напряжения. На этом этапе изучается классический вариант явления внутреннего резонанса между индуктивностью обмотки трансформатора и емкостью его главной изоляции. Проводятся экспериментальные исследования частотных характеристик трансформатора как носителей обобщенной информации о свойствах различных элементов конструкции, разрабатывается математическая модель трансформатора, с ее помощью изучаются электромагнитные процессы внутри трансформатора при действии на него перенапряжений со стороны сети. Важно отметить, что на этом этапе исследований не возникло никаких неразрешимых проблем методологического характера.

Проблемы начались при изучении параметров электромагнитных процессов в произвольно выбранной конкретной точке обмотки. Суть проблемы состояла в том, что при попытке реализации экспериментальных частотных характеристик в соответствии с известными канонами ТОЭ [17] результаты параметров режима, полученные с помощью синтезированных математических моделей, *не совпадали* с результатами экспериментальных исследований! Это был критический этап исследований. Уже на этом этапе экспериментально был установлен факт неравномерного распределения напряжения 50 Гц вдоль обмотки ВН в режиме короткого замыкания трансформатора [16].

Изложенная в [18–22] методология исследований электромагнитных процессов в трансформаторах при действии на них перенапряжений представляет собой качественно новый уровень знаний:

- объясняющий причины недостаточной надежности витковой изоляции и неадекватности научных рекомендаций по предупреждению витковых замыканий;
- обосновывающий необходимость адаптации теории цепей к решению нового класса задач по исследованию характеристик общего электромагнитного поля, существующего одновременно в средах с различными электрическими свойствами, трансформатора;
- устраняющий при моделировании нарушение принципа взаимности взаимоиндукции в реальных трансформаторах;
- предлагающий способы адаптации теории цепей к решению нового класса задач, учета резонансных процессов в обмотках под действием потока взаимоиндукции и нелинейности характеристик магнитопровода при действии на трансформатор одновременно соизмеримых по величине перенапряжений разных частот;
- обеспечивающий адекватность воспроизведения электромагнитных процессов в обмотках трансформаторов.

Основные результаты исследования

Исследования проводились на трансформаторе, характеристики которого и методы экспериментального исследования описаны в [21]. В качестве

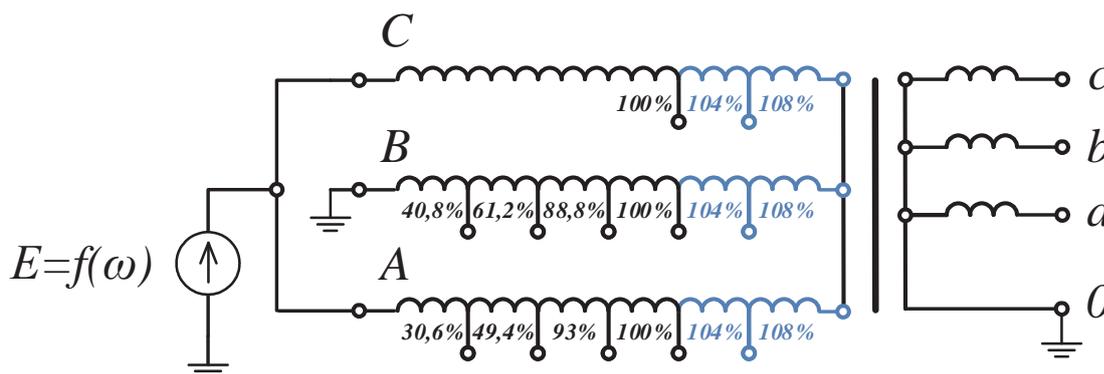


Рис. 1. Схема испытания трансформатора с указанием выводов обмоток ВН и НН, на которых производились измерения

Fig. 1. Circuit of the transformer testing with winding terminals of high voltage (HV) and low voltage (LV) at which the measurements were carried out

расчетного был выбран режим однофазного замыкания в сети с изолированной нейтралью. В этом случае на двух неповрежденных фазах сети возникают свободные составляющие перенапряжений, совпадающие по фазе. Такой режим удобно эквивалентировать при снятии частотных характеристик, подавая сигнал высокочастотного генератора на две закороченные фазы трансформатора. Третью фазу заземляли и присоединяли к другому выводу генератора (рис. 1).

Учитывая разное количество сделанных дополнительных выводов от основной части обмотки ВН разных фаз и некоторое отличие характеристик сопротивления холостого хода крайних фаз А и С от характеристики для фазы В, опыты проводились в двух вариантах: при замыкании на землю фазы С и при замыкании на землю фазы В. В первом варианте закорачивались фазы А и В. Во втором – А и С (рис. 1).

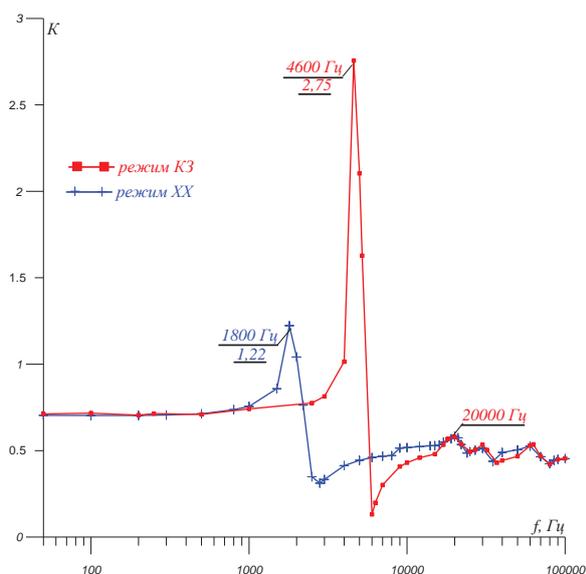


Рис. 2. Зависимость величины напряжения в нейтрали трансформатора от частоты приложенного напряжения при замыкании фазы В сети на «землю»

Fig. 2. Dependence of voltage value in the transformer neutral wire on frequency of the applied voltage at B phase-to-ground fault in the network

Распределение приложенного напряжения между обмотками А, С и В (рис. 1), в зависимости от частоты приложенного напряжения, показано на рис. 2. Как видно из рис. 2, на частоте 1,8 кГц между обмотками А, С и В, в режиме холостого хода трансформатора, наступает резонанс напряжений. Максимальное напряжение обмотки фазы В достигает значения 1,22 от приложенного. Некоторое подобие резонансных процессов наблюдается также при частоте 20 кГц.

В нагрузочном режиме работы трансформатора к его обмотке низкого напряжения (НН) подключены воздушные или кабельные линии, конденсаторы компенсирующих устройств и т. д. Для высокочастотных перенапряжений, действующих на трансформатор это эквивалентно режиму КЗ обмотки НН. Распределение приложенного напряжения между обмотками А, С и В для случая короткого замыкания обмотки НН также показано на рис. 2. Как видно из рис. 2, замыкание обмотки НН увеличивает частоту резонанса напряжения с 1,8 до 4,6 кГц и кратность перенапряжений с 1,22 до 2,75. Важно, что характер распределения напряжений между обмотками зависит от частоты. В свою очередь распределение напряжений вдоль отдельных обмоток также зависит от частоты. Применительно к схеме рис. 1 распределение напряжения вдоль обмоток трансформатора показано на рис. 3.

Классическое распределение напряжений при отсутствии резонансных явлений для частоты 50 Гц показано на рис. 3 жирными линиями. Как видно из рис. 3, в зависимости от частоты приложенного напряжения наблюдаются два принципиально разных случая резонансных явлений. Первый – напряжение в нейтрали (на фазе В) больше, чем при частоте 50 Гц. Это частоты 1800 и 2000 Гц для режима холостого хода и частоты 4600, 4700 Гц для режима короткого замыкания. В этом случае наблюдается резонанс между напряжениями взаимной индукции обмоток фаз А, С и В. Второй случай – напряжение нейтрали меньше классического при частоте 50 Гц. Частоты 15,1; 15,5; 30,31 кГц и 17; 31,1; 33 кГц соответственно для режимов холостого хода и короткого замыкания трансформатора. В этом случае резонансные процессы происходят в каждой из обмоток

ВН независимо друг от друга. Механизм их возникновения описан в [18]. Важно, что в режиме холостого хода при резонансе напряжений взаимной индукции в частях отдельных обмоток ВН возникают не только магнитные потоки рассеяния в обмотках ВН, но и магнитные потоки взаимной индукции, которые наводят перенапряжения в отключенных обмотках НН [22] (рис. 4). Как видно из рис. 4, с ростом частоты приложенного к трансформатору напряжения кратность перенапряжений в обмотках НН растет. При замыкании на «землю» фазы С сети несколько изменяются как кратности перенапряжений фаз а, в, с обмоток НН, так и резонансные частоты (рис. 5).

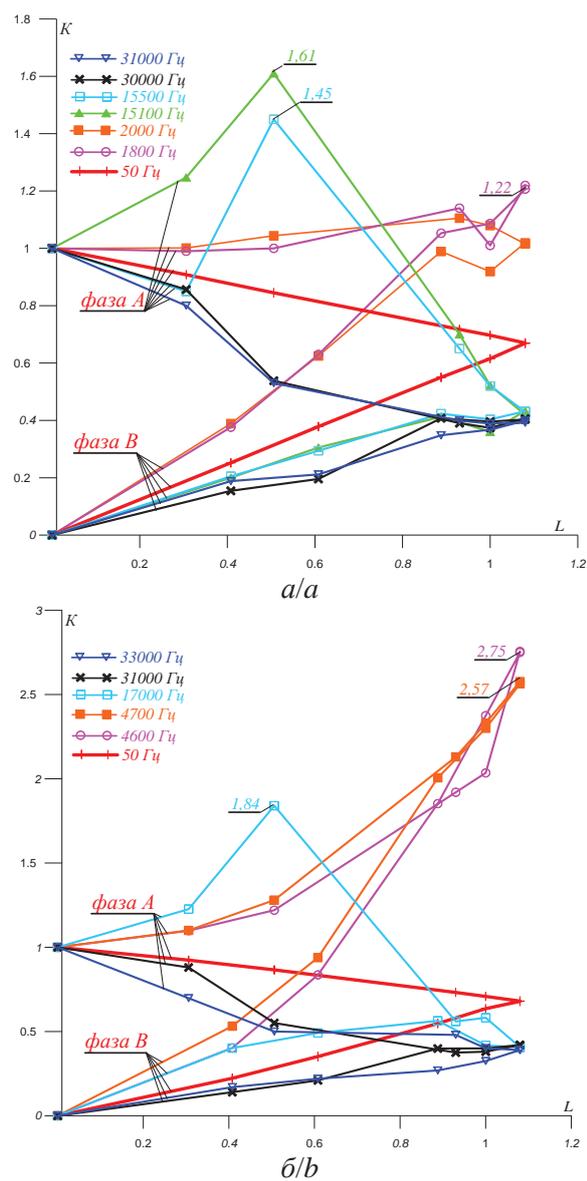


Рис. 3. Распределение перенапряжений вдоль обмоток ВН фаз А и В трансформатора для случая однофазного замыкания на фазе В сети: а) режим холостого хода обмоток НН; б) режим короткого замыкания обмоток НН

Fig. 3. Over-stress distribution along the windings of HV phases A and B of the transformer for a case of single-phase fault at the phase B of the network: a) idle condition of LV windings; b) fault conditions of LV windings

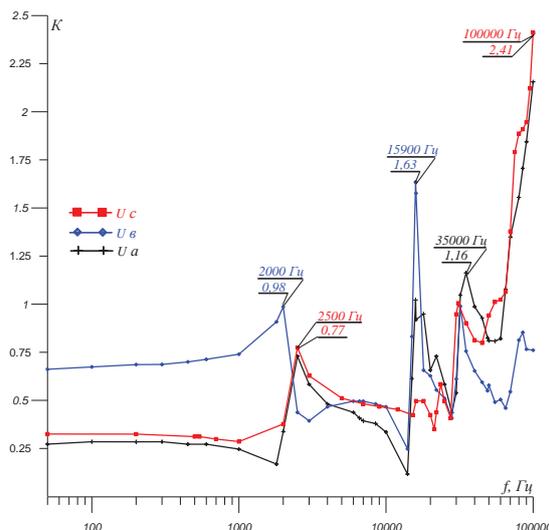


Рис. 4. Зависимость кратностей перенапряжений в отключенных обмотках НН при замыкании на землю фазы В трансформатора от частоты воздействующих перенапряжений

Fig. 4. Dependence of overvoltage ratios in shutdown LV windings at ground short circuit of the transformer phase B on frequency of the incoming over-stress

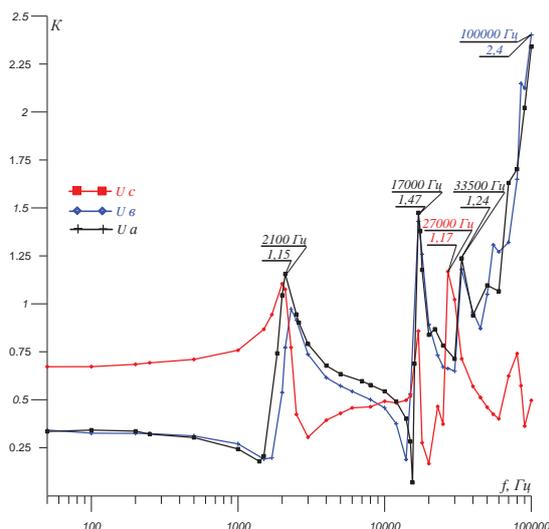


Рис. 5. Зависимость кратностей перенапряжений в отключенных обмотках НН при замыкании на землю фазы С трансформатора от частоты воздействующих перенапряжений

Fig. 5. Dependence of overvoltage ratios in shutdown LV windings at ground short circuit of the transformer phase C on frequency of the incoming over-stress

Важной, ранее неизвестной особенностью процессов при внутреннем резонансе является неравномерность распределения напряжения вдоль обмоток. В результате градиенты напряжения на отдельных частях обмоток превышают кратности перенапряжений на всей обмотке, что нужно учитывать при обосновании необходимых уровней продольной изоляции обмоток. Распределение градиентов напряжения вдоль обмоток трансформатора в режиме холостого хода трансформатора, при замыкании фазы В сети, в зависимости от частоты приложенного напряжения показано на рис. 6. Как следует из рис.

6, б наибольшие градиенты напряжения для заземленной фазы В формируются на регулировочной части обмотки ВН (100–108 %), которая в данном опыте обтекается током замыкания на «землю» (в диапазоне частот 50–17000 Гц), а также на части основной обмотки ВН (88–100 %), примыкающей к нейтрали (при частотах больших 17 кГц). Для фазы А, подключенной к источнику напряжения, дополнительно к опасным участкам фазы В, появилась, при частотах 15–17 кГц, опасная зона в начале обмотки (0–30,6 %, рис. 6, а). Для режима КЗ обмотки НН (рис. 7) опасные зоны не изменились (93–100 и 100–108 %). Изменились резонансные частоты, и возросли кратности перенапряжений.

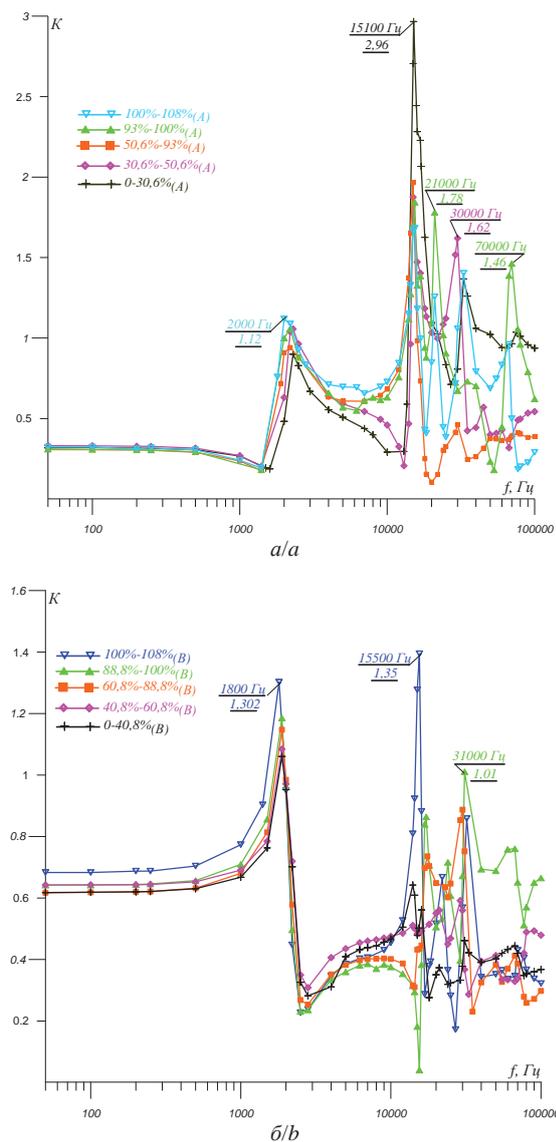


Рис. 6. Распределение градиентов напряжения вдоль обмоток ВН трансформатора в режиме холостого хода при замыкании фазы В сети в зависимости от частоты приложенного напряжения для обмотки фазы: а) А; б) В

Fig. 6. Distribution of stress gradients along the windings of the HV transformer in idle mode at B phase fault in the network depending on frequency of the applied stress for the winding of the phase: а) А; б) В

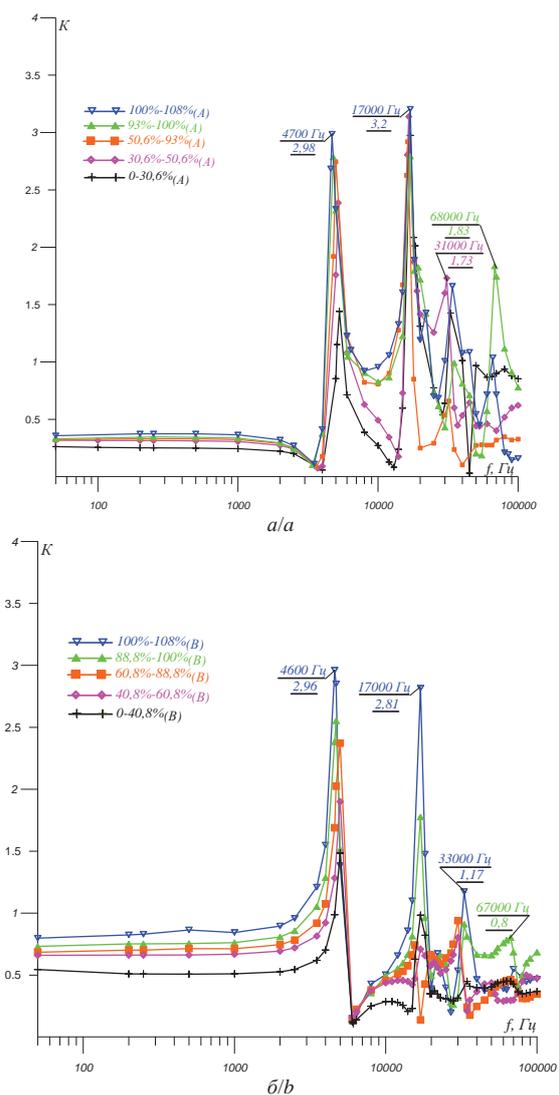


Рис. 7. Распределение градиентов напряжения вдоль обмоток ВН трансформатора в режиме короткого замыкания при замыкании фазы В сети в зависимости от частоты приложенного напряжения для обмотки фазы: а) А; б) В

Fig. 7. Distribution of stress gradients along the windings of the HV transformer in short circuit condition at B phase fault in the network depending on frequency of the applied stress for the winding of the phase: а) А; б) В

Рассмотренные выше режимы холостого хода и КЗ обмотки НН трансформатора являются крайними расчетными режимами. Важно иметь представление об особенностях электромагнитных процессов в реальных нагрузочных режимах. На рис. 8 показана аналогичная рис. 2 зависимость, но для реальных нагрузочных режимов, которые имитировались подключением ко всем фазам обмотки НН конденсаторов емкостью 60, 30, 10 или 1 мкФ. Эти емкости обеспечивали для промышленной частоты 50 Гц загрузку трансформатора реактивной мощностью, соответствующей 15; 7,5; 2,5; 0,25 % от номинальной. Соответственно зависимость кратностей перенапряжений в обмотке НН (фаза б) при замыкании на землю фазы В сети

для разных нагрузочных режимов обмотки НН трансформатора от частоты воздействующего напряжения показана на рис. 9. Поскольку распределение напряжения вдоль обмоток ВН трансформатора зависит от значения емкости конденсаторов, используемых в качестве нагрузки обмотки НН, на рис. 10 показано такое распределение на примере конденсатора емкостью 30 мкФ.

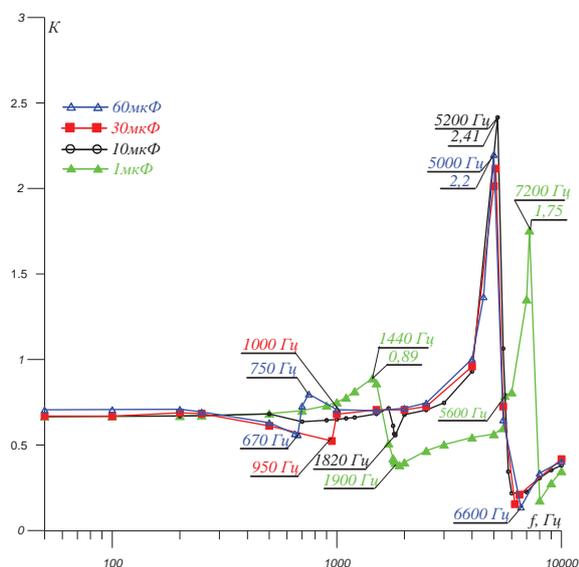


Рис. 8. Зависимость величины напряжения в нейтрали трансформатора от частоты приложенного напряжения при замыкании фазы В на «землю» для разных нагрузочных режимов обмотки НН трансформатора

Fig. 8. Dependence of stress in the transformer neutral on frequency of the applied stress at B phase ground fault for different load modes of the transformer LV winding

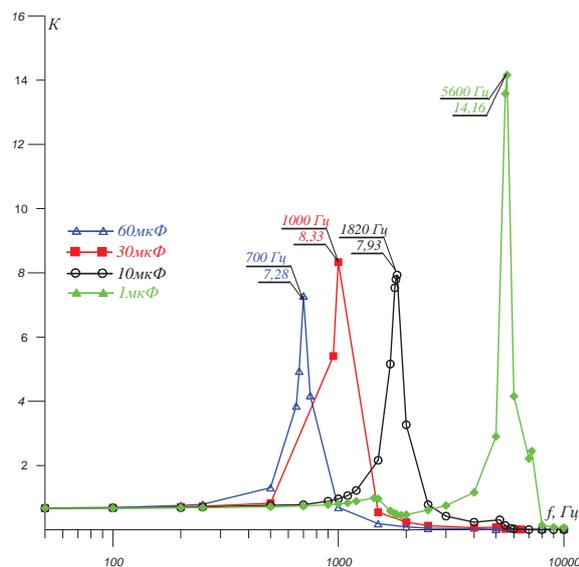


Рис. 9. Зависимость кратности перенапряжений в обмотке НН (фаза б) при замыкании на землю фазы В для разных нагрузочных режимов обмотки НН трансформатора от частоты воздействующих перенапряжений

Fig. 9. Dependence of overvoltage ratio in LV winding (phase b) at B phase ground fault on frequency of the impacting stress

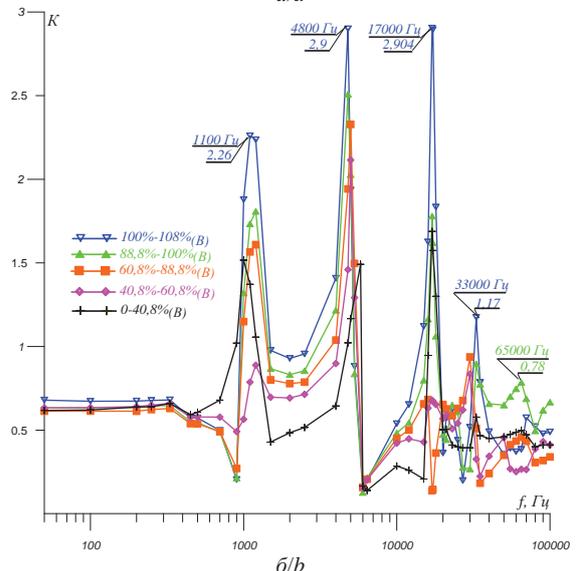
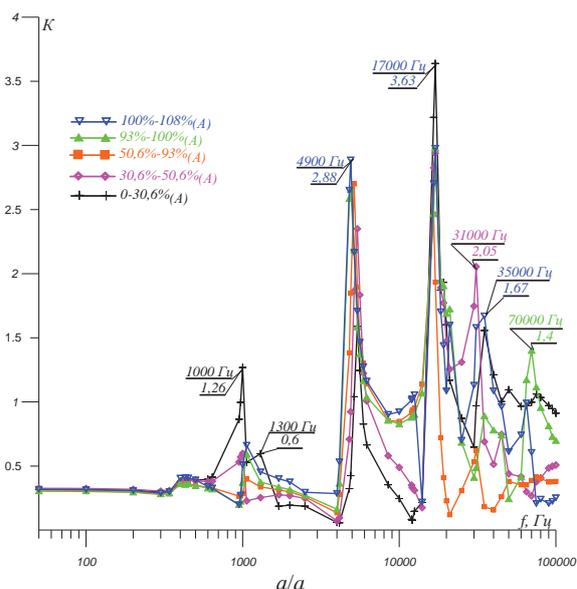


Рис. 10. Распределение градиентов напряжения вдоль обмоток ВН трансформатора для емкостной нагрузки обмоток НН 30 мкФ при замыкании фазы В сети в зависимости от частоты приложенного напряжения: а) фаза А обмотки ВН б) фаза В обмотки ВН

Fig. 10. Distribution of stress gradients along the transformer HV windings for the capacitive load of LV windings 30 μF at B phase fault depending on frequency of the applied stress: а) phase A of HV winding; б) phase B of HV winding

Анализ результатов опытов, представленных на рис. 8–10, впервые показывает, что резонансные частоты процессов, которые наблюдаются в элементах трансформатора, зависят не только от параметров трансформатора, но и от параметров сети, в которую этот трансформатор отдает электроэнергию. Резонансные частоты процессов в обмотках НН отличаются от резонансных частот процессов между обмотками ВН и внутри обмоток ВН. Различается также интенсивность резонансных процессов. Так, например, резонансные процессы между индуктивностью трансформатора и емкостью сети НН в диапазоне частот 700–7000 Гц

характеризуются кратностями перенапряжений на стороне НН в диапазоне 7–14 (рис. 9). Эти же процессы проявляются в обмотках ВН кратностями 2–3 (рис. 10). Воздействие на обмотки ВН перенапряжений с частотой больше 7000 Гц обуславливает появление перенапряжений в обмотках ВН с кратностью до 3 (рис. 10), но исключает какие-либо перенапряжения в обмотках НН (рис. 9). Важно отметить, что резонансные частоты с опасными кратностями перенапряжений в обмотках ВН определяются исключительно параметрами трансформатора, в то время как резонансные частоты с опасными кратностями перенапряжений для изоляции обмоток НН и оборудования потребителей электроэнергии определяются исключительно параметрами нагрузки трансформатора и, в зависимости от их величины в текущий момент времени, охватывают весь диапазон от 50 до 7000 Гц.

Приведенные выше исследования относятся к распределительным трансформаторам со схемой соединения Y/Y-0, которые при несимметричной нагрузке обуславливают появление на шинах потребителя несимметрии напряжения. Для улучшения качества электроэнергии часто используют трансформаторы со схемой соединения D/Y-0, которые имеют малое сопротивление нулевой последовательности. При соединении обмоток ВН исследуемого трансформатора (рис. 1) в «треугольник» получается стандартный трансформатор 11/0,4 кВ. Для получения максимально возможной информации в опытах заземлялась точка соединения фаз А и В, а генератор высокочастотных сигналов подключался к началу и концу обмотки фазы С одновременно. Программа исследований трансформатора со схемой соединения Δ/Y-0 повторяла программу исследований трансформатора со схемой соединения Y/Y-0.

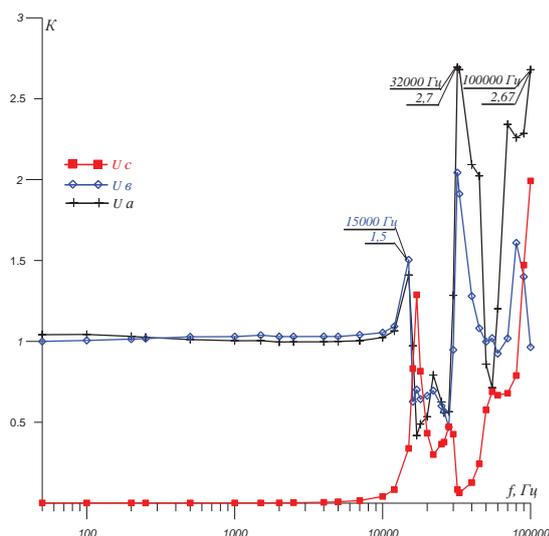


Рис. 11. Зависимость кратностей перенапряжений в отключенных обмотках НН при замыкании на «землю» в питающей сети для трансформатора со схемой соединения обмоток Δ/Y-0

Fig. 11. Dependence of overvoltage ratio in shutdown LV windings at ground fault in supply net for the transformer with Δ/Y-0 winding circuit

Зависимость кратностей перенапряжений в отключенных обмотках НН при замыкании на «землю» в питающей сети для трансформатора со схемой соединения обмоток Δ/Y-0 представлена на рис. 11, а распределение градиентов напряжения вдоль обмотки ВН (фаза А) – на рис. 12. Сравнение данных рис. 11 и 4 показывает, что для схемы соединения Δ/Y-0 перенапряжения развиваются одновременно на двух фазах а и в. Это повышает вероятность повреждения изоляции. Обращает внимание также отсутствие перенапряжений на частоте 2–2,5 кГц, характерных для трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Y-0, двукратное увеличение кратности перенапряжений на частотах 32–33,5 кГц и наличие перенапряжений на высоких частотах на фазе с, хотя обмотка ВН фазы С в опыте была закорочена.

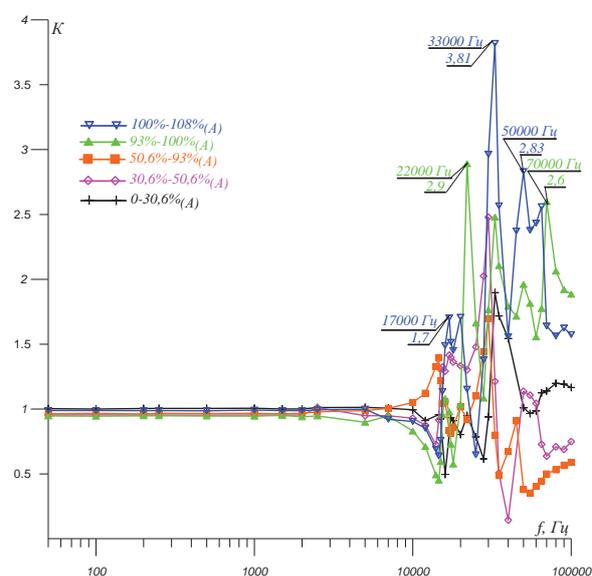


Рис. 12. Распределение градиентов напряжения вдоль обмотки ВН (фаза А) трансформатора со схемой соединения обмоток Δ/Y-0 в режиме холостого хода при замыкании на «землю» в питающей сети

Fig. 12. Distribution of stress gradients along HV winding (phase A) of the transformer with Δ/Y-0 winding circuit in idle conditions at ground fault in supply net

Сравнение данных рис. 12 и 6 показывает, что для обмотки ВН фазы А изменились резонансные частоты, кратности перенапряжений и характер распределения напряжения вдоль обмотки ВН. Так же как и на стороне НН отсутствуют перенапряжения на частоте 2 кГц.

Распределение градиентов напряжения вдоль обмотки ВН (фаза А) в режиме короткого замыкания обмоток НН для трансформатора при однофазном замыкании в питающей сети показано на рис. 13. По резонансным частотам это распределение практически совпадает с данными рис. 12, но характеризуется большими кратностями перенапряжений.

Влияние реальных нагрузочных режимов на характер электромагнитных процессов при замыкании в питающей сети на «землю» иллюстрируют рис. 14, 15. На рис. 14 представлена зависимость кратности перенапряжений в обмотке НН (фаза В) от

частоты воздействующих перенапряжений, а на рис. 15 соответственно показано распределение градиентов напряжений вдоль обмотки ВН (фаза А). Сравнение данных рис. 14 и 9 показывает, что изменение схемы соединения обмоток привело к увеличению и без того высоких кратностей перенапряжений еще в 1,6–1,8 раза. Сравнение данных рис. 15 и 13 показывает, что перенапряжения на резонансных частотах рис. 9 и 14 проявляются также и в обмотках ВН, но со значительно меньшими кратностями. Следует заметить, что эти перенапряжения остаются опасными для продольной изоляции обмоток ВН.

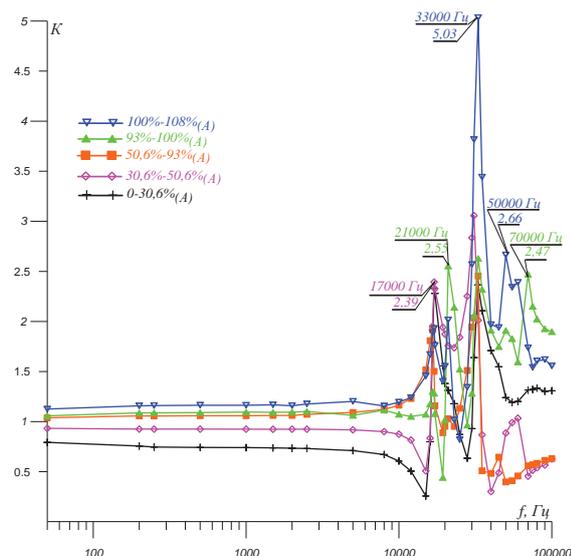


Рис. 13. Распределение градиентов напряжения вдоль обмотки ВН (фаза А) трансформатора со схемой соединения обмоток $\Delta/Y-0$ в режиме короткого замыкания обмоток НН при замыкании на «землю» в питающей сети

Fig. 13. Distribution of stress gradients along HV winding (phase A) of the transformer with $\Delta/Y-0$ winding circuit in short circuit conditions at ground fault in supply net

Проведение экспериментальных исследований, в том числе представленных выше, дает уникальную возможность разобраться в физике электромагнитных процессов при внутреннем резонансе, но, учитывая, что все резонансные процессы развиваются во времени, не позволяет сформулировать практические рекомендации по повышению надежности работы трансформаторов. Необходимый результат можно получить только с помощью математического моделирования этих процессов. Современное состояние разрабатываемых методов моделирования, в том числе с учетом последних, весьма представительных публикаций, таких, например, как [9, 10], не позволяет воспроизвести с помощью моделирования установленные в [18–22], а также в настоящей статье следующие экспериментальные факты:

- 1) неравномерное распределение приложенного напряжения вдоль обмоток трансформаторов;
- 2) возникновение резонансных процессов в отключенных обмотках и их частях под действием стороннего магнитного потока;

- 3) обратное влияние резонансных процессов в отключенных обмотках или их частях на величину стороннего магнитного потока;
- 4) резонансные частоты процессов, которые наблюдаются в элементах трансформатора, зависят не только от параметров трансформатора, но и от параметров сети, в которую этот трансформатор отдает электроэнергию.

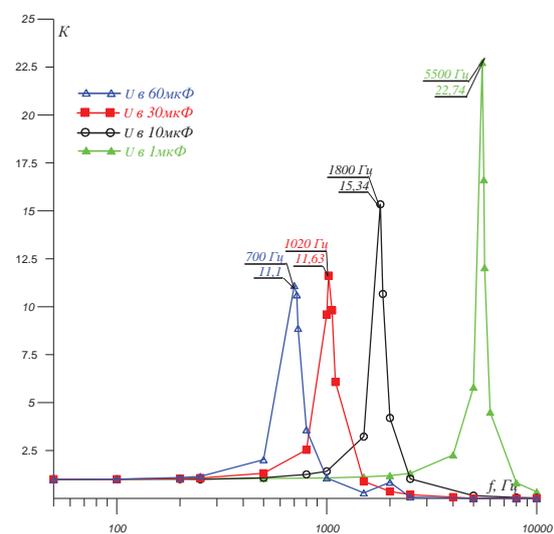


Рис. 14. Зависимость кратности перенапряжений в обмотке НН (фаза В) при замыкании на «землю» в питающей сети для разных нагрузочных режимов обмотки НН трансформатора от частоты воздействующих перенапряжений

Fig. 14. Dependence of overvoltage ratio in LV winding (phase B) at ground fault in supply net for different load modes of LV transformer on frequency of impacting overvoltage

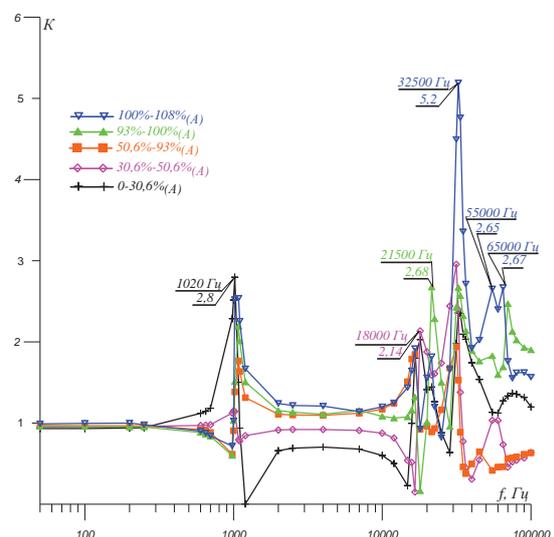


Рис. 15. Распределение градиентов напряжения вдоль обмотки ВН (фаза А) трансформатора со схемой соединения обмоток $\Delta/Y-0$ для емкостной нагрузки обмоток НН 30 мкФ при однофазном замыкании питающей сети в зависимости от частоты приложенного напряжения

Fig. 15. Distribution of stress gradients along HV winding (phase A) of the transformer with $\Delta/Y-0$ winding circuit for capacitive load of LV winding 30 μF at one-phase fault in supply net depending on the applied voltage

Выводы

1. Обмотки трансформатора, при действии на них перенапряжений со стороны питающей сети, следует рассматривать как цепи с распределенными *неоднородными* параметрами, между продольными элементами которых существует явление взаимоиנדукции.
2. При действии перенапряжений одновременно на группу обмоток может возникнуть не только резонанс между напряжениями взаимоиנדукции частей одной обмотки, но и резонанс между напряжениями взаимоиנדукции одинаковых обмоток разных фаз.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле. 8-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1986. – 263 с.
2. Васютинский С.Б. Вопросы теории и расчета трансформаторов. – Л.: Энергия, 1970. – 432 с.
3. Сапожников А.В. Уровни изоляции электрооборудования высокого напряжения. Нормы и методы испытания электрической прочности. – М.: Энергия, 1969. – 296 с.
4. ГОСТ 1516.1–76*. Электрооборудование переменного тока на напряжение от 3 до 500 кВ. Требования к электрической прочности изоляции. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 61 с.
5. 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.
6. Руководство по защите электрических сетей 6–1150 кВ от грозных и внутренних перенапряжений. РД 153–34.3–35.125–99. 2-е изд. Утверждено Первым заместителем председателя Правления РАО «ЕЭС России» О.В. Бритвиным 12.07.1999 г. – СПб.: Из-во ПЭИПК. 1999. – 333 с.
7. 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.
8. 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.
9. Electrical Transient Interaction between Transformers and the Power System. P. 1. Expertise, Joint Working Group A2/C4.39, Brochure 577A. – Paris: CIGRE, Apr. 2014. – 175 p.
10. Electrical Transient Interaction between Transformers and the Power System. P. 2. Case studies, Joint Working Group A2/C4.39, Brochure 577B. – Paris: CIGRE, Apr. 2014. – 123 p.
11. Dommel H.W. Electromagnetic Transients Program. Reference Manual. (EMTP Theory Book). – Portland, OR: Bonneville Power Administration, 1986. – 700 p.
12. Semlyen A., Dabuleanu A. Fast and accurate switching transient calculations on transmission lines with ground return using recursive convolutions // IEEE Trans. Power App. Syst. – NY, Mar./Apr. 1975. – V. PAS-94. – № 2. – P. 1. – P. 561–575.
13. Gustavsen B., Mo O. Interfacing convolution based linear models to an electromagnetic transients program // Proc. Int. Conf.

3. Резонансные частоты с опасными кратностями перенапряжений в обмотках ВН определяются исключительно параметрами трансформатора.
4. Резонансные частоты с опасными кратностями перенапряжений в обмотках НН определяются исключительно параметрами сети, в которую трансформатор отдает электроэнергию.
5. Для формулирования предложений по повышению надежности работы продольной изоляции трансформаторов необходима разработка методологии исследований и моделирования электромагнитных процессов, при действии на трансформатор перенапряжений со стороны питающей сети.

- Power Systems Transients. – Lyon, France, Jun. 4–7, 2007. – 6 p.
14. 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.
15. Сегеда М.С., Черемних Є.В., Мазур Т.А. Математичне моделювання вільних коливань напруги в обмотках трансформаторів з урахуванням взаємоіндукції між витками під час імпульсних перенапруг // Науковий бюлетень Дніпропетровськ НГУ. – 2013. – № 1. – С. 68–76.
16. Физические явления внутреннего резонанса в электрооборудовании с обмотками высокого напряжения / И.Р. Бучковский, М.М. Молнар, А.Л. Никонец, Л.А. Никонец, М.Б. Сабат / под ред. Л.А. Никонца. – Львов: НВФ «Українські технології», 2012. – 167 с.
17. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники, электрические цепи. 8-е изд. – М.: Высшая школа, 1984. – 560 с.
18. Электромагнитные процессы и условия возникновения резонансных перенапряжений в обмотках трансформатора / М.Б. Сабат, А.Л. Никонец, В.П. Венгер, В.П. Венгер // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 325. – № 4. – С. 91–102.
19. Никонец А.Л., Венгер В.П., Венгер В.П. Методы исследования электромагнитных процессов в обмотках трансформаторов при действии на них перенапряжений со стороны сети // Известия Томского политехнического университета. – 2015. – Т. 326. – № 3. – С. 86–98.
20. Никонец Л.А., Никонец А.Л., Венгер В.П. Моделирование электромагнитных процессов в обмотках трансформаторов при действии на них перенапряжений сети // Известия Томского политехнического университета. – 2015. – Т. 326. – № 4. – С. 125–137.
21. Распределение воздействующих на трансформатор напряжений вдоль обмотки ВН / Л.А. Никонец, М.Б. Сабат, И.Р. Бучковский, Р.В. Бучковский, А.Л. Никонец, В.П. Венгер, В.П. Венгер // Электрические станции. – 2014. – № 2. – С. 51–56.
22. Никонец А.Л., Венгер В.П., Венгер В.П. Электромагнитные процессы в обмотках трансформатора при действии на него перенапряжений // Электрические станции. – 2014. – № 12. – С. 18–26.

Поступила 07.09.2015 г.

UDC 621.3.013.62; 621.314.21; 621.314.222.8

ENERGY EFFICIENT PRODUCTION AND TRANSFORMATION BASED ON GEO ASSETS

Aleksey L. Nykonets,

National University Lviv Polytechnic, 12, St. Bandery street, Lviv city,
79013, Ukraine. E-mail: nykonets@gmail.com

Vladimir P. Venger,

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

Viktor P. Venger,

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

The relevance of the study. Electrical energy is one of the most important resources on the planet, which is used everywhere and lets other industries work. Electrical-power transmission from the place, where electrical energy is produced, to the place, where it is consumed, as one of the fundamental principle of the world power supply process, is possible because of its parameters transformation, done by a transformer. The phenomenon of internal resonance has not been taken into consideration by any executive directive in the World during reasoning the necessary level of longitudinal insulation. Studying the phenomenon and stating recommendations will help to increase the working reliability of transformers.

The main aim of the research is to study the features of internal resonance phenomenon appearance with a group of transformer windings influenced by network overvoltage simultaneously.

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

The results. The important unknown before feature of the processes during internal resonance is inequality of voltage distribution along windings. Resonance frequencies of the processes, which are observed in transformer elements, depend not only on parameters of a transformer, but also on network parameters, which the transformer gives energy into. Resonance frequencies of the processes in low voltage windings differ from resonance frequencies of the processes between high voltage windings and within the high voltage winding. The intensity of resonance processes is also different, which results in significantly different overvoltage ratios.

Key words:

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

REFERENCES

1. Bessonov L.A. *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki. Elektromagnitnoe pole* [Theory of electrotechnology. Electromagnetic field]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1986. 263 p.
2. Vasyutinsky S.B. *Voprosy teorii i rascheta transformatorov* [Problems of transformer theory and computation]. Leningrad, Energiya Publ., 1970. 432 p.
3. Sapozhnikov A.V. *Urovni izolyatsii elektrooborudovaniya vysokogo napryazheniya. Normy i metody ispytania elektricheskoy prochnosti* [Insulation levels of high-voltage electrical equipment. Standards and methods of electric strength test]. Moscow, Energiya Publ., 1969. 296 p.
4. *GOST 1516.1–76*. Elektrooborudovanie 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, Izdatelstvo standartov, 1985. 61 p.
5. *GOST 1516.2–97. Mezhdunarstvenny standart. Elektrooborudovanie i elektroustanovki peremennogo toka na napryazhenie 3 kV i vyshe. Obschie metody ispytaniy elektricheskoy prochnosti izolyatsii* [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.
6. *Rukovodstvo po zashchite elektricheskikh setey 6–1150 kV ot grozovykh i vnutrennikh perenapryazheniy. RD 153–34.3–35.125–99. Utverzhdeno Pervym zamestitel'em predsedatelya Pravleniya RAO «EES Rossii» O.V. Britvinym 12.07.1999 g.* [Manual on 6–1150 kV electrical network protection against lightning and internal overvoltage. RD 153–34.3–35.125–99. Approved by the first vice-chairman of the board of «RAO EES Russia» O.V. Britvin 12.07.1999]. S-Petersburg, PEIPK Publ. house, 1999. 333 p.
7. *GOST 1516.3–96. Mezhdunarstvenny standart, elektrooborudovanie peremennogo toka na napryazhenie ot 1 do 750 kV. Trebovaniya k elektricheskoy prochnosti izolyatsii* [State Standard 1516.3–96. 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.
8. *Energetika za rubezhom. Transformatory. Perenapryazheniya i koordinatsiya izolyatsii: perevody dokladov Mezhdunarodnoy konferentsii po Bolshym elektricheskim sistemam (SIGRE-84)* [Power engineering abroad. Transformers. Overvoltage and insulation management. Translations of international conference reports of big electrical systems (SIGRE-84)]. Eds. S.D. Lizunov, A.K. Lokhanin. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986. 420 p.
9. *Electrical Transient Interaction between Transformers and the Power System. P. 1. Expertise, Joint Working Group A2/C4.39, Brochure 577A.* Paris, CIGRE, Apr. 2014. 175 p.
10. *Electrical Transient Interaction between Transformers and the Power System. P. 2. Case studies, Joint Working Group A2/C4.39, Brochure 577B.* Paris, CIGRE, Apr. 2014. 123 p.
11. Dommel H.W. *Electromagnetic Transients Program. Reference Manual. (EMTP Theory Book)*. Portland, OR, Bonneville Power Administration, 1986. 700 p.
12. Semlyen A., Dabuleanu A. Fast and accurate switching transient calculations on transmission lines with ground return using re-

- cursive convolutions. *IEEE Trans. Power App. Syst.* NY, Mar./Apr. 1975, vol. PAS-94, no. 2, pt. 1, pp. 561–575.
13. Gustavsen B., Mo O. Interfacing convolution based linear models to an electromagnetic transients program. *Proc. Int. Conf. Power Systems Transients*. Lyon, France, Jun. 4–7, 2007. 6 p.
 14. Kirilenko O.V., Segeda M.S., Butkevich O.F., Mazur T.A. *Matematychni modelyuvannya v elektroenergetytsi: pidruchnyk* [Mathematical modelling in power engineering; textbook]. Lviv, Lviv Polytechnic Press, 2010. 608 p.
 15. Segeda M.S., Cheremnykh E.V., Mazur T.A. Matematychni modelyuvannya vilnykh kolyvan napruhy v obmotkakh transformatoriv z urakhuvannyam vzaemoinduktzii 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]. *Scientific bulletin of Dnepropetrovsk NGU*, 2013, no. 1, pp. 68–76.
 16. Buchkovsky I.R., Molnar M.M., Nikonets A.L., Nikonets L.A., Sabat M.B. *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.A. Lviv, Ukrainian technologies Publ., 2012. 167 p.
 17. Bessonov L.A. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniky, elektricheskikh tsepi* [Theory of electrotechnology, electrical circuits]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1984. 560 p.
 18. Sabat M.B., Nikonets A.L., Venger V.P., Venger V.P. Elektromagnitnye protsessy i usloviya vznikoveniya rezonansnykh perenapryazheniy v obmotkakh transformatora [Electromagnetic processes and conditions of appearance of resonance overvoltage in transformer windings]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 325, no. 4, pp. 91–102.
 19. Nykonets A.L., Venger V.P., Venger V.P. Metody issledovaniya elektromagnitnykh protsessov v obmotkakh transformatorov pri deystvii na nikh perenapryazheniy so storony seti [Research methods of electromagnetic processes in transformer windings influenced by power system overvoltage]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2015, vol. 326, no. 3, pp. 86–98.
 20. Nykonets L.A., Nykonets A.L., Venger V.P. Modelirovanie elektromagnitnykh protsessov v obmotkakh transformatorov pri deystvii na nikh perenapryazheniy seti [Modeling of electromagnetic processes in transformer windings influenced by network overvoltage]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2015, vol. 326, no. 4, pp. 125–137.
 21. Nykonets L.A., Sabat M.B., Buchkovsky I.R., Buchkovsky R.V., Nikonets A.L., Venger V.P., Venger V.P. Raspredeleniye vozdeystviy na transformator napryazheniy vdol obmotki VN [Voltage distribution influencing a transformer along high voltage winding]. *Elektricheskie stantsii*, 2014, no. 2, pp. 51–56.
 22. Nykonets A.L., Venger V.P., Venger V.P. Elektromagnitnye protsessy v obmotkakh transformatora pri deystvii na nego perenapryazheniy [Electromagnetic processes in transformer windings influenced by overvoltage]. *Elektricheskie stantsii*, 2014, no. 12, pp. 18–26.

Received: 07 September 2015.