

УДК 621.3.013.62;621.314.21;621.314.222.8

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ОБМОТКАХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПРИ ДЕЙСТВИИ НА НИХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ СО СТОРОНЫ СЕТИ

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.

Цель работы: сформулировать причины несоответствия используемых наукой методов исследования существу исследуемой проблемы и обосновать возможные направления по усовершенствованию методов исследования.

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

Результаты. Причиной несоответствия используемых наукой методов исследования существу проблемы является допущение о возможности раздельного рассмотрения электрического и магнитного полей единого электромагнитного поля. Совместное рассмотрение единого электромагнитного поля показывает, что линия с распределенными параметрами (в качестве которой выступают обмотки и их части) является неоднородной.

Выводы. Адекватное отображение реальных физических процессов в обмотках трансформатора в математических моделях невозможно без моделирования как собственных сопротивлений рассеяния обмоток и их частей, так и сопротивлений взаимной индукции между ними с учетом нарушения в реальных трансформаторах принципа взаимности взаимной индукции. Разработан метод реализации функций частотных характеристик комплексных сопротивлений, в котором предложено перейти от реализации функции двух независимых переменных $Z(p)=Z(j\omega)=R(\omega)+jX(\omega)$ к реализации двух независимых функций одной переменной $Z_s(\omega)=R(\omega)$ и $Z_x(\omega)=X(\omega)$. Метод исключает необходимость аппроксимации $Z(p)$ как отношения двух полиномов, не имеющих общих корней. Корректное использование методов теории расчета цепей с сосредоточенными параметрами позволяет проводить анализ параметров электромагнитных процессов в конкретных точках объекта с распределенными параметрами при наличии взаимной индукции между его продольными элементами. Имеющиеся в мировой технической литературе публикации об электромагнитных процессах в крупных трансформаторах при внутренних резонансах не могут быть признаны как достоверные, если их результаты получены с использованием теории расчета электрических цепей с сосредоточенными параметрами без внесения необходимых корректив.

Ключевые слова:

Трансформатор, резонансные перенапряжения, электромагнитные процессы, продольная изоляция, витковая изоляция.

Анализ результатов выполненных исследований по изучению явления внутреннего резонанса

Методология любого исследования должна быть адекватна сути проблемы. Предмет нашего исследования – трансформатор – объект с распределенными параметрами, у которого между продольными элементами обмоток и между обмотками разных фаз существует явление взаимной индукции. По сути исследование электромагнитных процессов в трансформаторе – задача по исследованию параметров электромагнитного поля, существующего в средах с разными электрическими свойствами, на границах которых должны выполняться определенные условия (граничные условия) [1]. Сложность количественного математического описания

процессов требовала упрощения первоначальной, подлежащей решению, физической задачи.

Применительно к промышленным трансформаторам упрощение было достигнуто за счет раздельного 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.

Повреждения трансформаторов на сверхвысокие напряжения (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. 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 (А2/С4. 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 [11] через обобщенную электрическую схему или с помощью численного интегрирования уравнений состояния [12, 13].

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 об-

мотках 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 [14]. 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 [15] 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 [14].

В [16] 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.

В [17] исследовалось распределение напряжения вдоль обмотки ВН в диапазоне частот 50–100000 Гц и обоснована необходимость использования для учета влияния взаимной индукции в объекте с распределенными параметрами методами теории цепей наряду с классическими параметрами (элементами) электрической цепи R, L, C дополнительных параметров –R, –L, –C.

В [18] исследованы процессы при действии на обмотку стороннего магнитного потока. Показано впервые, что сторонний магнитный поток способен в отключенной обмотке вызывать резонансные процессы.

Задачи исследований – сформулировать причины несоответствия используемых наукой методов исследования существу исследуемой проблемы и обосновать возможные направления по усовершенствованию методов исследования.

Изложение основных результатов исследования

Причины несоответствия используемых наукой методов исследования существу проблемы

Для решения поставленной задачи важны не столько факты, установленные в [16–18], сколько причина, по которой эти факты были неизвестны, то есть отдельное рассмотрение магнитного поля без увязки его с электрическим полем в трансформаторе (наличие частичных емкостей между витками, а также между витками и корпусом трансформатора). В результате реальная картина магнитных полей рассеяния в трансформаторе принципиально отличается от картины, которую дает существующая теория [2], что делает линию с распределенными параметрами (в качестве которой выступает обмотка) *неоднородной*. Причем, как следует из [14], этот эффект проявляется уже на частоте 50 Гц. Из отмеченного следует, что все попытки детального описания конструкции трансформатора и составления на этой основе соответствующей программной реализации, такие, например, как [9, 10, 19, 20], теоретически несостоятельны.

Классическое раздельное рассмотрение влияния магнитных и электрических полей предполагает [19, 20] достаточность при математическом моделировании процессов учета наличия магнитных связей между магнитопроводом и обмотками, падения напряжения на сопротивлениях рассеяния от протекания токов нагрузки, а также однородности цепей с распределенными параметрами. Моделирование процессов в обмотках, результат которого изложен в [16–18] с применением подходов [19, 20], принципиально невозможно.

Таким образом, общепринятое допущение о раздельном учете магнитных и электрических полей для задач рассматриваемого класса оказалось теоретически несостоятельным.

С практической точки зрения следует признать достаточность количественного анализа параметров процессов в ограниченном (пусть и достаточно большом) числе точек внутри объема трансформатора, что должно принципиально упростить научную задачу. Такая постановка задачи предполагает замену отдельных частей объекта с распределенными параметрами конечным числом эквивалентных двухполюсников с сосредоточенными параметрами, характеристики которых определяются частотными методами. Это должно сделать корректным использование методов теории расчета цепей с сосредоточенными параметрами и обеспечить учет взаимного влияния магнитных и электрических полей. Под эквивалентными параметрами двухполюсников мы понимаем такие параметры,

которые обеспечивают адекватность параметров электромагнитных процессов реального объекта с распределенными параметрами и модели трансформатора с сосредоточенными параметрами относительно выбранных точек внутри трансформатора. Модель трансформатора следует рассматривать как «черный (серый) ящик».

Принципиально важным отличием свойств части реального объекта с распределенными параметрами от свойств конечного числа двухполюсников с сосредоточенными параметрами, которые эквивалентизируют часть реального объекта, является неизменность величин тока каждого двухполюсника, чего нет в части реального объекта, где взаимная индукция обеспечивается одной из составляющих полного тока. Это обстоятельство обеспечивает необходимость особого обоснования состава элементов двухполюсника для эквивалентирования свойств части реального объекта.

Принципиально мы во время эксперимента можем измерить ток на входе или выходе из обмотки. Общеизвестно, что значение тока внутри обмотки может быть больше тока на выходе за счет появления в обмотке уравнивающей составляющей, которая вызывает добавочные потери. Ставя в соответствие току на входе другие параметры режима, которые мы измеряем в разных точках обмотки, получаем требуемые параметры *модели*, а не оригинала.

По сути, речь идет об адаптации теории расчета цепей с сосредоточенными параметрами к решению нового класса задач – исследованию параметров электромагнитных процессов в заданных точках объема объекта с распределенными параметрами при наличии взаимной индукции между продольными элементами обмотки. Если говорить на языке математики, то вместо поиска общего решения полевой задачи – найти численными методами любое количество частных решений.

Нарушение принципа взаимности взаимной индукции в реальных трансформаторах

Решение одной проблемы всегда вызывает появление следующей. Каким образом следует в модели учесть установленные в [16–18] факты? Для ответа на этот вопрос необходимо понимать причины существования описанных в [16–18] явлений.

Из результатов [16–18] можно сделать предположение: если сторонний магнитный поток вызывает в обмотках резонансные процессы, то должно быть обратное влияние резонансных процессов в обмотках, под действием приложенного напряжения, на величину стороннего потока. При рассмотрении взаимного влияния сторонний магнитный поток более правильно назвать общим для двух разных обмоток потоком, или потоком взаимной индукции. Подтверждение либо опровержение выдвинутой выше гипотезы поможет более четко понимать физику процесса, а следовательно, и математическому анализу количественной его стороны.

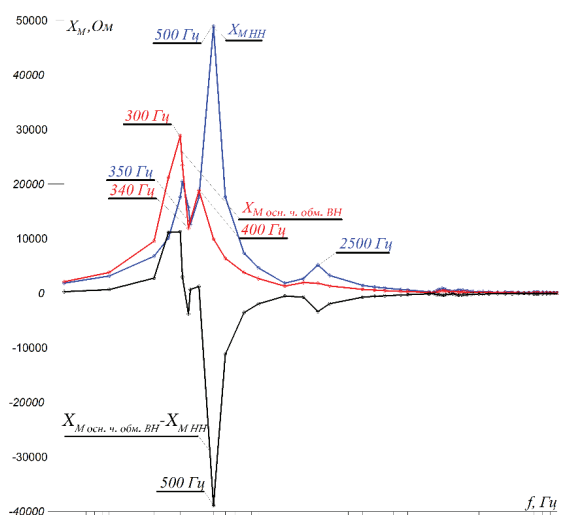


Рис. 1. Зависимость сопротивлений взаимоиндукции $X_{M(осн. ч. обм. ВН)}$ и $X_{M(НН)}$, которые определяют величины дополнительных э.д.с., вносимых соответственно в контуры обмотки низкого напряжения (НН) и основной части обмотки высокого напряжения (ВН), от частоты источника питания

Fig. 1. Dependence of mutual induction resistance $X_{M(осн. ч. обм. ВН)}$ and $X_{M(НН)}$, which determine the value of additional e.m.f. introduced into low voltage winding circuit and the major part of the high voltage winding, on supply frequency

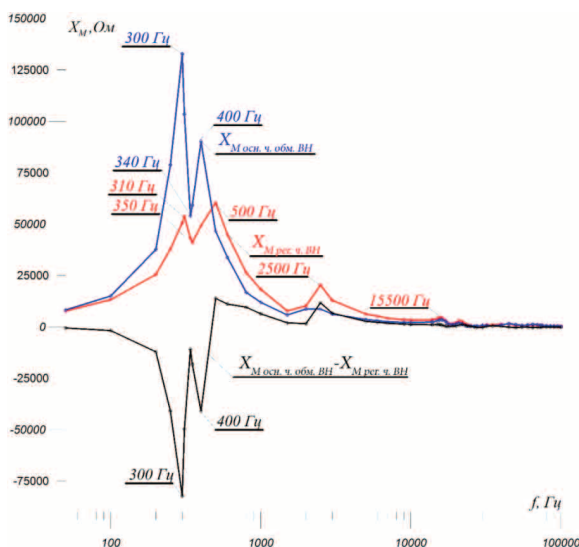


Рис. 2. Зависимость сопротивлений взаимоиндукции $X_{M(осн. ч. обм. ВН)}$ и $X_{M(рег. ч. ВН)}$, которые определяют величины дополнительных э.д.с., вносимых соответственно в контуры основной и регулировочной части обмотки ВН, от частоты источника питания

Fig. 2. Dependence of mutual induction resistance $X_{M(осн. ч. обм. ВН)}$ and $X_{M(рег. ч. ВН)}$, which determine the value of additional e.m.f. introduced into the circuits of high voltage winding major and control parts, on supply frequency

На рис. 1–3 представлены соответственно частотные характеристики сопротивлений взаимоиндукции между основной частью обмотки ВН и обмоткой НН ($X_{M(осн. ч. обм. ВН)}$ и $X_{M(НН)}$), между основной

и регулировочной частями обмотки ВН ($X_{M(осн. ч. обм. ВН)}$ и $X_{M(рег. ч. ВН)}$), а также между регулировочной частью обмотки ВН и обмоткой НН ($X_{M(рег. ч. обм. ВН)}$ и $X_{M(НН)}$). Индекс в обозначении сопротивления X_M указывает название обмотки, на которую было подано напряжение источника в момент измерения напряжения на другой обмотке. Измерения проводились для фазы А трехфазного трансформатора мощностью 20 кВА, который и ранее использовался для экспериментальных исследований [16–18]. Методика измерения частотных характеристик описана в [14, 16, 17].

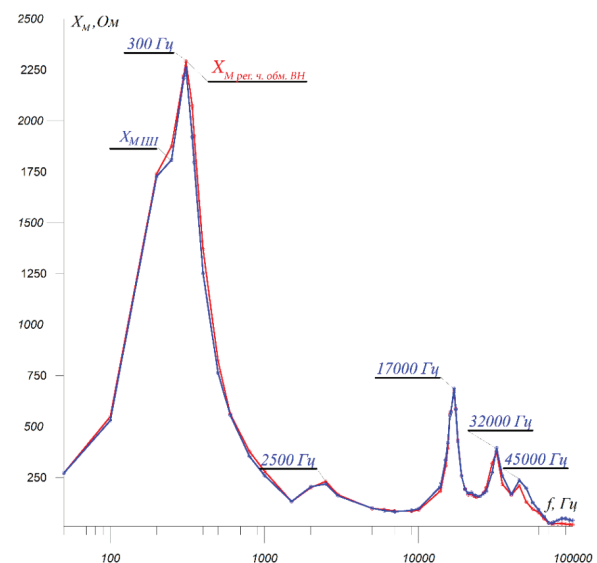


Рис. 3. Зависимость сопротивлений взаимоиндукции $X_{M(рег. ч. обм. ВН)}$ и $X_{M(НН)}$, которые определяют величины дополнительных э.д.с., вносимых соответственно в контуры обмотки НН и регулировочной части обмотки ВН, от частоты источника питания

Fig. 3. Dependence of mutual induction resistance $X_{M(рег. ч. обм. ВН)}$ and $X_{M(НН)}$, which determine the value of additional e.m.f. introduced into the circuits of low voltage winding and control part of high voltage winding, on supply frequency

Сопротивления взаимоиндукции определялись в соответствии с рекомендациями ТОЭ [15] как отношение измеренного на обмотке напряжения к току другой обмотки, которая является источником магнитного потока. Мы, конечно, понимаем, что при частотах больше 50 Гц ток, который создает магнитный поток, отличается от тока, который был измерен, но с позиций рассмотрения трансформатора в качестве «черного ящика» считаем такой подход оправданным.

Как следует из рис. 1, 2, сопротивления взаимоиндукции не равны между собой, что нарушает основополагающий принцип взаимности взаимоиндукции, декларируемый ТОЭ [15]. Для опытов, результаты которых представлены на рис. 3, нарушения принципа взаимности не произошло. Для количественной оценки степени нарушения принципа взаимности на рис. 1, 2 построены графики разности сопротивлений взаимоиндукции, определенных разными способами. Эти зависимости

впервые количественно демонстрируют возможную погрешность расчетов при использовании существующей теории цепей без ее адаптации к решению нового класса задач по исследованию электромагнитных процессов в объектах с распределенными параметрами при наличии взаимности между витками обмоток. Полученный экспериментальный результат заслуживает серьезного анализа.

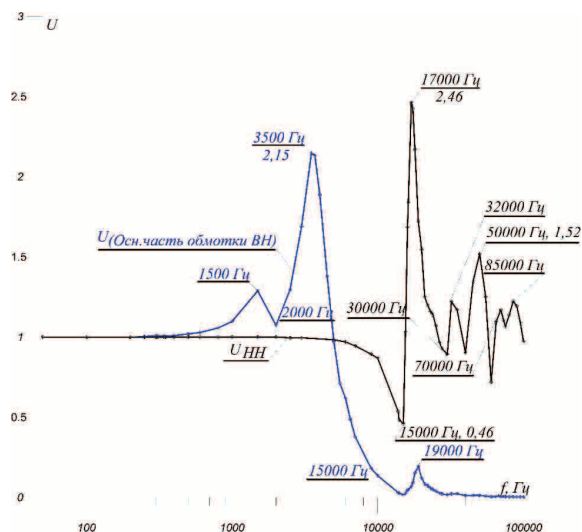


Рис. 4. Частотные характеристики напряжений взаимной индукции обмотки низкого напряжения $U_{НН}$ и основной части обмотки ВН $U_{осн.ч.ВН}$ в относительных номинальных единицах

Fig. 4. Frequency curves of mutual induction voltage in low voltage winding $U_{НН}$ and the main part of high voltage winding $U_{осн.ч.ВН}$ in relative nominal units

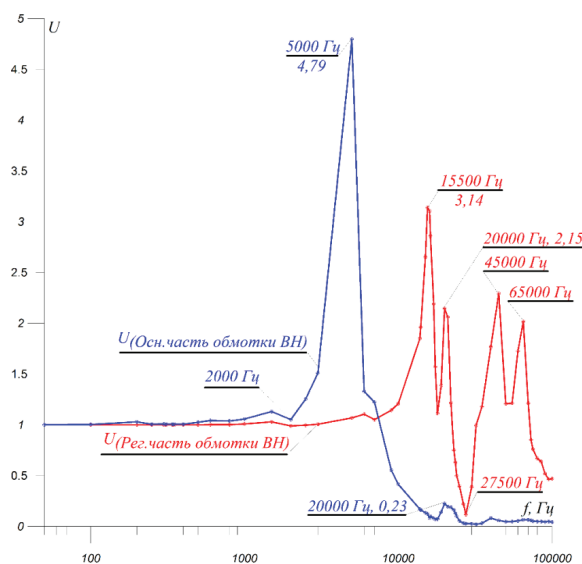


Рис. 5. Частотные характеристики напряжений взаимной индукции основной части обмотки высокого напряжения $U_{осн.ч.ВН}$ и регулировочной части обмотки ВН $U_{рег.ч.ВН}$ в относительных номинальных единицах

Fig. 5. Frequency curves of mutual induction voltage in the main part of high voltage winding $U_{осн.ч.ВН}$ and control part of high voltage winding in relative nominal units

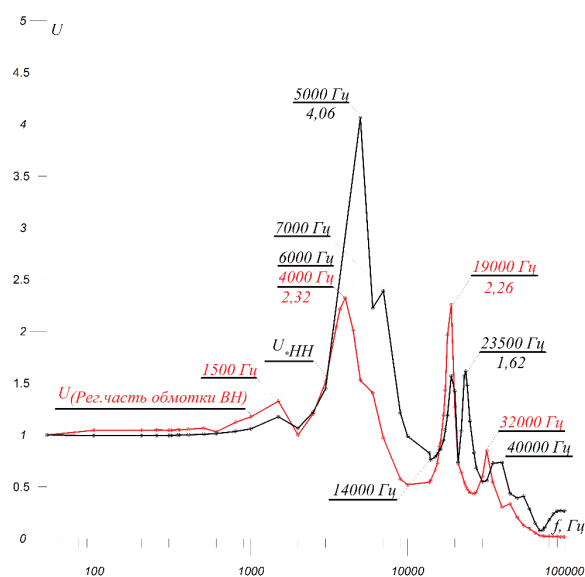


Рис. 6. Частотные характеристики напряжений взаимной индукции регулировочной части обмотки высокого напряжения $U_{рег.ч.ВН}$ и обмотки НН $U_{НН}$ в относительных номинальных единицах

Fig. 6. Frequency curves of mutual induction voltage in control part of high voltage winding $U_{рег.ч.ВН}$ and low voltage winding $U_{НН}$ in relative nominal units

Чтобы понять причины нарушения принципа взаимности взаимной индукции, напомним, что степень индуктивной связи двух катушек характеризуется коэффициентом связи K , определяемым как среднее геометрическое из отношений потока взаимной индукции M ко всему потоку катушки, то есть

$$K = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}, \quad (1)$$

где L_1, L_2 – индуктивности катушек.

Коэффициент связи K (1) всегда меньше единицы и возрастает с уменьшением потоков рассеяния катушек. Чтобы $M_{12} \neq M_{21}$, необходимо изменение по какой-либо причине значений L_1 и L_2 . Это возможно, если рассматривать L_1 и L_2 как эквивалентные величины, характеризующие процессы в реальных обмотках при частотах > 50 Гц. Наглядное представление о взаимном влиянии магнитных потоков обмоток и общего потока взаимной индукции дают результаты опытов по измерению напряжений взаимной индукции (рис. 4–6). Магнитный поток, генерируемый током в обмотке НН, начиная с частоты в несколько сотен Гц, наводит в основной части обмотки ВН (рис. 4) напряжение больше номинального, которое при частоте 3500 Гц достигает значения 2,15. При частотах больше 3500 Гц в обмотке НН начинают развиваться собственные резонансные процессы. Эквивалентная индуктивность L обмотки НН начинает расти, что приводит (1) к уменьшению потока взаимной индукции M , который при частотах больше 15000 Гц становится практически равным нулю.

Если подать напряжение на основную часть обмотки ВН, то ток, протекающий по обмотке ВН, создаст поток, который в обмотке НН наводит (рис. 4) напряжение взаимоиндукции $U_{\text{Н}}$. При увеличении частоты более 3000 Гц в основной части обмотки ВН начинают развиваться резонансные процессы, которые приводят к уменьшению потока взаимоиндукции. На частоте 15000 Гц его величина составляет лишь 0,46 от номинального значения. В диапазоне частот 15–17 кГц в основной части обмотки ВН наступает резонанс напряжений взаимоиндукции частей обмотки ВН [16]. Поскольку в процессе развития резонансных процессов фазы напряжений на участках обмотки изменяются на противоположные, а в диапазоне частот 15–19 кГц сумма модулей этих напряжений превышает модуль приложенного к обмотке напряжения, увеличиваются не только магнитные потоки частей обмотки, но и магнитный поток между обмотками, что отразилось на кратности перенапряжений обмотки НН, которая на частоте 17 кГц достигла значения 2,46. Резонанс напряжений под действием внешнего магнитного потока наступает также и в обмотке НН. При дальнейшем увеличении частоты вплоть до 100 кГц в обмотке НН резонансные процессы продолжают, достигая своего максимума на частоте 50 кГц.

В диапазоне частот 15–100 кГц возникает парадоксальная ситуация, когда магнитные потоки, создаваемые токами в обмотке НН, не достигают обмотки ВН, а потоки, создаваемые токами в обмотке ВН, достигают обмотку НН и вызывают в ней резонансные процессы.

Аналогичные процессы возникают также при магнитном взаимодействии между регулировочной и основной частями обмотки ВН (рис. 5). Принципиальным отличием в этом случае можно считать лишь другие резонансные частоты и кратности перенапряжений, которые возросли по сравнению с рис. 4 примерно в два раза.

Особая ситуация возникает при исследовании магнитного взаимодействия между регулировочной частью обмотки ВН и обмоткой НН (рис. 6). Из-за практического совпадения резонансных частот этих обмоток с ростом частоты наблюдается взаимное пропорциональное уменьшение роли магнитного взаимодействия между обмотками, что обеспечило в этом случае выполнение принципа взаимности взаимоиндукции (рис. 3).

Рассмотренные явления взаимного магнитного влияния разных обмоток и их частей характерны для всех без исключения типов оборудования с обмотками высокого напряжения. С практической точки зрения важно уметь определить возможные опасные резонансные частоты или их диапазоны, а также максимальные кратности перенапряжений на этих частотах. Для ответа на эти вопросы необходимо сравнить частотные характеристики собственных и взаимных сопротивлений разных обмоток или их частей с частотами, на которых возникают опасные перенапряжения.

На рис. 7–9 представлены частотные характеристики собственных и взаимных сопротивлений, соответственно, между основной частью обмотки ВН и обмоткой НН, между основной и регулировочной частями обмотки ВН, между регулировочной частью обмотки ВН и обмоткой НН.

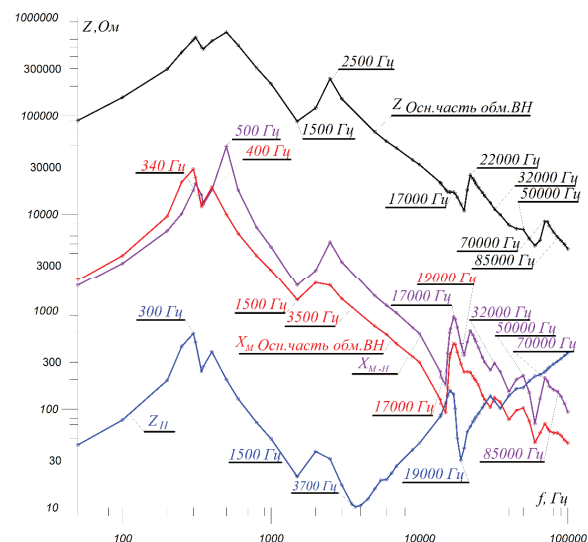


Рис. 7. Частотные характеристики собственных и взаимных сопротивлений основной части обмотки ВН $Z_{\text{осн.ч. обм.ВН}}$, $X_{M \text{ осн.ч. обм.ВН}}$ и обмотки НН $Z_{\text{НН}}$, $X_{M \text{ НН}}$

Fig. 7. Frequency curves of internal and mutual resistances of the main part of VH winding $Z_{\text{осн.ч. обм.ВН}}$, $X_{M \text{ осн.ч. обм.ВН}}$ and NV winding $Z_{\text{НН}}$, $X_{M \text{ НН}}$

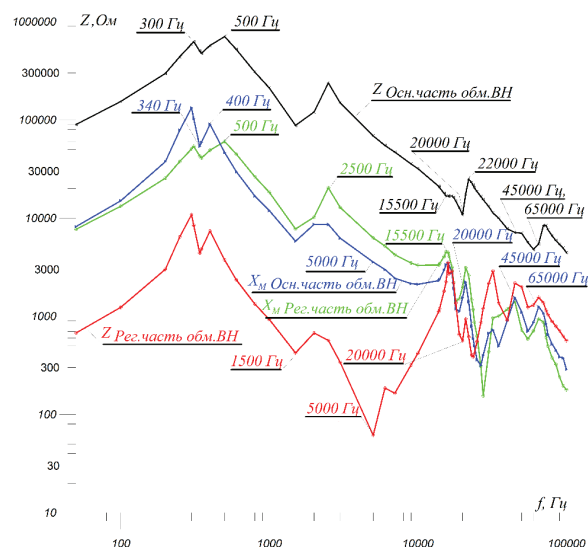


Рис. 8. Частотные характеристики собственных и взаимных сопротивлений основной части обмотки ВН $Z_{\text{осн.ч. обм.ВН}}$, $X_{M \text{ осн.ч. обм.ВН}}$ и регулировочной части обмотки ВН $Z_{\text{рег.ч. обм.ВН}}$, $X_{M \text{ рег.ч. обм.ВН}}$

Fig. 8. Frequency curves of internal and mutual resistances of the main part of VH winding $Z_{\text{осн.ч. обм.ВН}}$, $X_{M \text{ осн.ч. обм.ВН}}$ and control part of VH winding $Z_{\text{рег.ч. обм.ВН}}$, $X_{M \text{ рег.ч. обм.ВН}}$

В общем случае кратность перенапряжений на какой-либо обмотке или ее части должна зависеть от величины магнитного потока, который пересе-

кает эту обмотку, а также от характера резонансных процессов в самой обмотке. Величина внешнего, по отношению к обмотке, потока на заданной частоте зависит от значения сопротивления на данной частоте той обмотки, которая генерирует магнитный поток. Степень близости обмотки, в которой развиваются резонансные процессы, к резонансу характеризуют частотные характеристики сопротивления взаимной индукции между обмотками, а также собственного сопротивления.

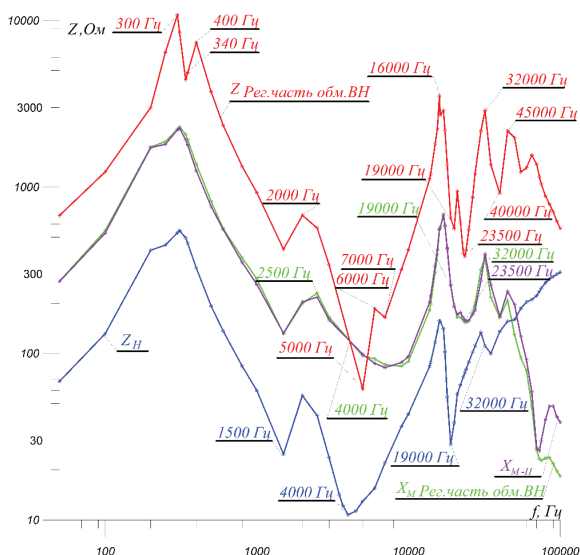


Рис. 9. Частотные характеристики собственных и взаимных сопротивлений регулировочной части обмотки ВН $Z_{\text{рег.ч.обм.ВН}}$, $X_{\text{М.рег.ч.обм.ВН}}$ и обмотки НН $Z_{\text{НН}}$, $X_{\text{М.НН}}$

Fig. 9. Frequency curves of internal and mutual resistances of the control part of ВН winding $Z_{\text{рег.ч.обм.ВН}}$, $X_{\text{М.рег.ч.обм.ВН}}$ and НН winding $Z_{\text{НН}}$, $X_{\text{М.НН}}$

Как видно из сравнения данных рис. 4 и 7, первый максимум перенапряжений на основной части обмотки ВН развился на частоте 1500 Гц, что соответствует резонансу напряжений как характеристики Z_n , так и характеристики $Z_{\text{осн.ч.ВН}}$. При этом характеристика $X_{\text{М.НН}}$ также проходит через свой локальный минимум. Второй максимум перенапряжений на частоте 3,5 кГц с кратностью 2,2 практически совпадает с частотой резонанса напряжений Z_n – 3,7 кГц.

Первый максимум перенапряжений на обмотке НН при частоте 17 кГц соответствует частоте резонанса напряжений частей обмотки ВН, а также частоте резонанса токов характеристик $X_{\text{М.осн.ч.ВН}}$ и Z_n . Далее в диапазоне 20–100 кГц идет серия перенапряжений меньшей кратности, пики которых соответствуют частичным максимумам характеристики $X_{\text{М.осн.ч.ВН}}$.

Для пары «регулирующая и основная части» обмотки ВН (рис. 5 и 8) перенапряжения в основной части обмотки ВН с кратностью около 5 наступают при частоте 5 кГц, что соответствует абсолютному минимуму характеристики $Z_{\text{рег.ч.ВН}}$.

Для регулировочной части обмотки ВН перенапряжения с высокими кратностями на частотах

15,5; 20; 45; 65 кГц соответствуют частотным максимумам характеристики $X_{\text{М.осн.ч.ВН}}$ и частотным минимумам характеристики $Z_{\text{осн.ч.ВН}}$.

Метод определения сопротивления обмоток и их частей

Условием, полностью гарантирующим адекватность модели, является как можно более точное воспроизведение экспериментальных частотных характеристик. Если о характере частотных характеристик собственных сопротивлений обмоток и их частей возможны дискуссии, то частотные характеристики сопротивлений взаимной индукции по определению являются на всех частотах *чисто индуктивными*. Классическая теория цепей не в состоянии предложить аппарат для описания и реализации представленных в статье частотных характеристик сопротивлений взаимной индукции.

Частотные характеристики элементов изоляции трансформатора отражают свойства проводимости и поляризации изоляции. Их экспериментальное определение и последующая математическая реализация [14] не вызывают принципиальных затруднений. Методика экспериментального определения параметров частотных характеристик для синтеза активных и реактивных составляющих сопротивлений моделей обмоток и их частей значительно сложнее. Требуется разработка эффективных методов их определения [9].

Схема замещения участка обмотки трансформатора представлена на рис. 10. Здесь \dot{I}_i – вектор тока участка обмотки; $\Delta \dot{E}_i$ – вектор напряжения, наведенного на витках участка обмотки основным магнитным потоком магнитопровода; \dot{Z}_i – вектор сопротивления участка обмотки; $\Delta \dot{U}_i$ – вектор падения напряжения на сопротивлении участка обмотки; \dot{U}_i – вектор напряжения на участке обмотки. Из рис. 10 следует:

$$\dot{Z}_i = \frac{\dot{U}_i - \Delta \dot{E}_i}{\dot{I}_i}, \quad (2)$$

где $\sum_{i=1}^n \dot{U}_i = E$ – э.д.с. источника питания.

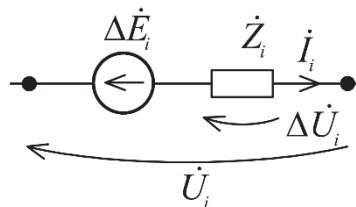


Рис. 10. Схема замещения модели участка обмотки трансформатора

Fig. 10. Equivalent circuit of the model of the transformer winding part

Как следует из (2), для определения комплексного сопротивления участка обмотки необходимо знать не только модули величин, но и фазы векторов уравнения (2).

Схема экспериментального определения значений сопротивления модели обмоток и их частей

трехфазного трансформатора представлена на рис. 11.

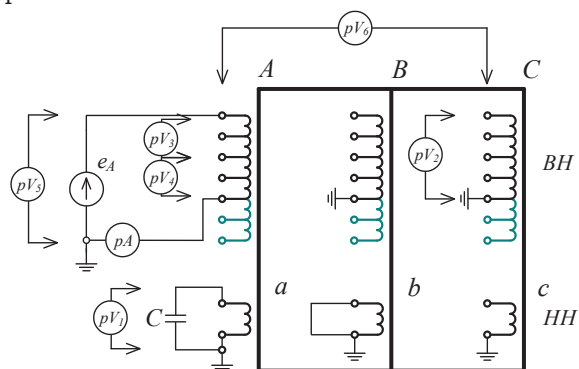


Рис. 11. Схема экспериментального определения значений сопротивления модели обмоток и их частей трехфазного трансформатора

Fig. 11. The circuit of experimental determination of the values for a winding model resistance and their parts of the three-phase transformer

В качестве нагрузки обмотки НН используется конденсатор с емкостью C . Изменяя частоту источника питания e_A , добиваемся наступления режима резонанса напряжения для фазы А трансформатора. Измеряем с помощью миллиамперметра pA значение тока I_i , которое принимаем одинаковым с током всей обмотки. По условию резонанса трансформатор потребляет от источника питания только активную мощность. Следовательно, фаза тока \dot{I}_i совпадает с фазой источника питания.

С помощью вольтметра pV_3 измеряем значение напряжения на выбранном участке обмотки ВН (фаза А), а с помощью вольтметров pV_4 и pV_5 измеряем значения напряжения между выводами выбранного участка обмотки и корпусом. Фазу источника e_A принимаем совпадающей с осью действительных чисел. Тогда фазы напряжений, измеряемых приборами pV_3 и pV_4 , можно определить из построения треугольника напряжений в соответствии со вторым законом Кирхгофа.

Особо следует остановиться на методе определения модуля вектора $\Delta \dot{E}_i$. Поскольку обмотки фаз А и В находятся очень близко друг к другу в окне магнитопровода, и между ними существует магнитная связь по путям замыкания потоков вне магнитопровода, то на обмотках фазы В трансформатора будет наводиться напряжение не только из-за замыкания магнитного потока в магнитопроводе фазы А через стержни магнитопровода фаз В и С, но также из-за наличия взаимной индукции по путям замыкания потока вне магнитопровода. Это затрудняет определение вектора $\Delta \dot{E}_i$. Поэтому было принято решение [18] закоротить обмотку НН фазы В, как наиболее близко расположенную к стержню магнитопровода фазы В. В этом случае модуль полного вектора $\Delta \dot{E}$ можно определить, измеряя с помощью вольтметра pV_2 напряжение на обмотке ВН (фаза С), с учетом того, что $\Delta \dot{E}_A = -\Delta \dot{E}_C$, а его часть $\Delta \dot{E}_i$ пересчитать через отношение витков i -го участка и всей обмотки. Так как трансформатор (фаза А) работает в режиме резонанса напряжений и его токи при заданной величине напряжения источника питания максимальны, обратным влиянием через магнитные связи по путям замыкания потока вне магнитопровода закороченной обмотки НН (фаза В) можно пренебречь.

Осталась последняя проблема – определение фазы вектора $\Delta \dot{E}_i$. Если с помощью вольтметра pV_6 измерить значение напряжения между выводами А и С обмотки ВН, то фазы напряжений, измеряемых приборами pV_3 , pV_6 и pV_2 , можно определить из построения треугольника напряжений.

Полная мощность, передаваемая из первичной обмотки трансформатора во вторичную обмотку:

$\dot{S}_{ТНН} = \Delta \dot{E} \dot{I}_A = \Delta E I_A \cos \varphi_{\Delta E} + j \Delta E I_A \sin \varphi_{\Delta E} = P_{ТНН} + j Q_{ТНН}$, (3)

где ΔE – значение напряжения, измеряемое вольтметром pV_2 .

Реактивная мощность, генерируемая конденсатором C , расходуется на компенсацию потерь реактивной мощности для создания магнитного потока в магнитопроводе, способного генерировать ЭДС ΔE , а также в обмотках трансформатора. Для определения потерь реактивной мощности в магнитопроводе трансформатора проводится отдельно опыт работы трансформатора в режиме холостого хода. Для его реализации конденсатор емкостью C отключается от обмотки НН. Ток холостого хода измеряется амперметром pA при напряжении источника питания e_A , достаточном для получения ЭДС ΔE , а реактивная мощность холостого хода определяется из уравнения:

$$Q_{xx} = E_{АХХ} I_{АХХ}. \quad (4)$$

Реактивная мощность, расходуемая в обмотках трансформатора $Q_{обм\Sigma}$, определяется из уравнения:

$$Q_{обм\Sigma} = \frac{U_{АНН}^2}{X_G} - Q_{xx}. \quad (5)$$

Теперь, зная величины $Q_{ТНН}$ и $Q_{обм\Sigma}$, необходимо определить значения реактивной мощности, расходуемые в каждой из обмоток:

$$Q_{НН} = Q_{обм\Sigma} \pm Q_{ТНН}, \quad Q_{ВН} = Q_{обм\Sigma} \mp Q_{ТНН}. \quad (6)$$

Далее определяются значения $X_{НН}$ и $X_{ВН}$ по значениям $Q_{НН}$ и $Q_{ВН}$ и величине тока I_A . Полученные значения $X_{НН}$ и $X_{ВН}$ могут быть использованы в качестве критерия для проверки полученных значений реактивной составляющей полного сопротивления \dot{Z}_i в соответствии с (2).

Значение $r_{НН}$ определяется из уравнения:

$$r_{НН} = \frac{P_{НН}}{I_A^2 k_r^2}, \quad (7)$$

где k_r – коэффициент трансформации трансформатора.

Важно, что, измеряя величину активной составляющей полной мощности \dot{S}_T для разных частот, можно получить уникальную зависимость изменения потерь активной мощности в обмотках трансформатора от частоты. По нашим данным, таких измерений ранее никогда не проводилось, а нужна

в такой информации огромна, так как позволяет учесть влияние высших гармоник в токе нагрузки.

Следует также указать, что в связи с отличием формы частотных характеристик сопротивления обмоток трансформатора и конденсатора при одном значении емкости C возможен резонанс на нескольких частотах. Полученные значения \dot{Z}_i , а также \dot{Z}_1 относятся к случаю, когда нагрузочный ток протекает по обеим обмоткам трансформатора, то есть с учетом наличия взаимоиндукции между обмотками ВН и НН по путям замыкания магнитных потоков вне магнитопровода. Для случая, когда одна из обмоток отключена, \dot{Z}_i , а также $\dot{Z}_{\text{нн}}$ будут отличаться от полученных в соответствии с описанным методом.

Метод адаптации теории цепей
к решению нового класса задач

ТОЭ [15] утверждает, что синтезом электрических цепей называют определение структуры электрических цепей и значений параметров входящих в них элементов по заданным частотным или временным свойствам цепей. Каким бы образом ни были заданы характеристики двухполюсника, четырехполюсника и т. п., они должны удовлетворять условию физической реализуемости. ТОЭ и раньше встречались с ситуациями, когда индуктивность L получалась с отрицательным знаком. В [15] даже излагается метод Бруне, который «состоит в том, чтобы три магнитно не связанные катушки, имеющие индуктивности L_1, L_2, L_3 , одно из значений которых является отрицательным, заменить трансформатором, состоящим из двух катушек с индуктивностями L_4, L_5 , между которыми имеется магнитная связь (взаимная индуктивность M)».

В нашем случае отрицательные значения параметров сопротивлений модели являются следствием взаимоиндукции в объекте с распределенными параметрами. Наличие взаимоиндукции между частями одной обмотки обуславливает появление в этих частях уравнивающих токов, фазы которых сдвинуты на 180 электрических градусов, а отношение их значений определяется отношением числа витков в рассматриваемых частях. В результате протекания уравнивающих токов на отдельных частях обмотки возникают падения напряжения с фазами, также сдвинутыми на 180 электрических градусов. В модели обмотки с сосредоточенными параметрами токи во всех частях обмотки одинаковы, что не позволяет стандартным образом учесть фазу падения напряжения. Остается единственный выход: принимать значения параметров сопротивлений частей обмоток в модели с разными знаками. Нам представляется требование ТОЭ о физической реализуемости модели избыточным. Достаточным условием следует признать условие математической реализуемости модели.

Изложенные в [15] методы синтеза предполагают, что все элементы модели должны быть физиче-

ские реализуемые. Кроме того, частотные характеристики должны аппроксимироваться отношением двух полиномов, что практически невозможно реализовать при диапазоне частот 50–100000 Гц.

Нами предлагается наряду с классическими параметрами (элементами) электрической цепи R, L, C [15] ввести дополнительно параметры (элементы) $-R, -L, -C$. Использование дополнительных параметров позволяет методами теории цепей решать новый класс задач по определению параметров электрических процессов в конкретных точках объекта с распределенными параметрами при наличии взаимоиндукции между продольными элементами обмотки.

Физический смысл вновь вводимых дополнительных параметров следующий:

$-C$ – расчетная индуктивность, значение сопротивления которой изменяется обратно пропорционально от значения частоты, которая отображает влияние взаимоиндуктивности на фазу тока в части обмотки и величину обменной реактивной мощности между частями обмотки;

$-L$ – расчетная емкость, значение сопротивления которой прямо пропорционально значению частоты, которая отображает влияние взаимоиндуктивности на фазу тока в части обмотки и величину обменной реактивной мощности между частями обмотки. Конкретное соотношение параметров $-C$ и $-L$ в расчетной схеме определяет направление передачи реактивной мощности из одной части обмотки в другую;

$-R$ – расчетное для данной частоты активное сопротивление, которое отображает влияние взаимоиндукции на величину обменной активной мощности между частями обмотки.

Метод реализации функций частотных характеристик
комплексных сопротивлений

Задачей моделирования является реализация функции комплексного сопротивления модели части обмотки $Z(p)=Z(j\omega)=R(\omega)+jX(\omega)$ для диапазона частот 50–100000 Гц. Критерием адекватности моделирования является среднеквадратическое отклонение значений реализуемой функции от требуемых значений, определенных частотными характеристиками $R(\omega)$ и $X(\omega)$. Таким образом, реализуемая функция содержит две независимые переменные: частоту ω и аргумент φ . Предложенный нами метод заключается в переходе от реализации функции двух независимых переменных $Z(j\omega)=R(\omega)+jX(\omega)$ к реализации двух независимых функций одной переменной $Z_R(\omega)=R(\omega)$ и $Z_X(\omega)=X(\omega)$.

Модель, отображающая зависимость $R(\omega)$ или $X(\omega)$, представляет собой цепочку из n последовательно соединенных двухполюсников, каждый из которых состоит из параллельно соединенных элементов R_i, L_i и C_i , где $i=1...n$. При этом данные двухполюсники имеют комплексное сопротивление, поэтому в модели $R(\omega)$ неизбежно появляется реактивная составляющая $jX_R(\omega)$, а в модели

$X(\omega)$ – активная составляющая $R_x(\omega)$, каждая из которых вносит в соответствующую модель значительные погрешности. В результате обе функции приобретают комплексный вид:

$$Z_R(j\omega) = R(\omega) + jX_R(\omega), Z_X(j\omega) = R_X(\omega) + jX(\omega). \quad (8)$$

В каждой из моделей необходимо устранить эти погрешности. Для этого модель $R(\omega)$ делится на две части. Одна часть синтезируется по значению $0,5R(\omega)$. Результирующая функция первой половины имеет вид $Z_{R1}(j\omega) = 0,5R(\omega) + jX_R(\omega)$. Вторая половина модели полностью копирует первую за исключением знаков элементов L_i и C_i , которые во всех двухполюсниках принимаются противоположными, тогда $Z_{R2}(j\omega) = 0,5R(\omega) - jX_R(\omega)$. Обе половины модели соединяются последовательно; в результате

$$Z_R(j\omega) = Z_{R1}(j\omega) + Z_{R2}(j\omega) = 0,5R(\omega) + jX_R(\omega) + 0,5R(\omega) - jX_R(\omega) = R(\omega). \quad (9)$$

Аналогично моделируется необходимое значение $X(\omega)$, при этом одна часть модели синтезируется по значению $0,5X(\omega)$, вторая половина полностью копирует первую со сменой знаков элементов R_i всех двухполюсников на противоположные. Обе половины также соединяются последовательно:

$$Z_X(j\omega) = Z_{X1}(j\omega) + Z_{X2}(j\omega) = R_X(\omega) + j0,5X_R(\omega) - R_X(\omega) + j0,5X(\omega) = jX(\omega). \quad (10)$$

Таким образом, становится возможным независимое моделирование значений $R(\omega)$ и $X(\omega)$.

Математическая реализация позволяет получить необходимый результат со среднеквадратической погрешностью на уровне 10 %, что достаточно для практических целей исследования.

Помимо решения данной задачи, предложенный метод впервые предоставляет возможность решения и других задач, например задачи учета изменения сопротивления проводника от частоты (поверхностный эффект).

Выводы

1. Частотные характеристики сопротивлений взаимной индукции имеют резонансный характер с ярко выраженными точками, которые соответствуют условиям как резонанса токов, так и резонанса напряжений обмоток, которые пересекаются магнитным потоком взаимной индукции. Таким образом, тезис о взаимном влиянии общего магнитного потока между обмотками и потока рассеивания обмотки, которая пересекается общим магнитным потоком, можно считать доказанным.
2. Поскольку в общем случае частотные характеристики собственных сопротивлений разных обмоток различны, должны быть различными и сопротивления взаимной индукции, определенные разными способами.
3. Величины перенапряжений на элементах обмоток определяются соотношением частей общего магнитного потока, замыкающегося вне и по магнитопроводу.

4. Адекватное отображение реальных физических процессов в обмотках трансформатора в математических моделях невозможно без моделирования как собственных сопротивлений рассеяния обмоток и их частей, так и сопротивлений взаимной индукции между ними с учетом нарушения в реальных трансформаторах принципа взаимности взаимной индукции.
5. Нарушение принципа взаимности взаимной индукции обуславливает невозможность синтеза универсальной модели трансформатора, которая способна адекватно реагировать на любые воздействия со стороны сетей всех классов напряжения, к которым может быть подключен трансформатор.
6. Принципиально можно создать специализированную модель для исследования одного или группы родственных процессов при заданном виде воздействия.
7. Разработан метод определения значений сопротивлений моделей обмоток и их частей.
8. Математическая реализация моделей, синтезированных на основе методов теории расчета электрических цепей с сосредоточенными параметрами для анализа параметров процессов в объектах с распределенными параметрами невозможна без введения в теорию дополнительных параметров электрических цепей $-R$, $-L$, $-C$ и дополнения традиционных методов моделирования магнитных связей через магнитопровод взаимной индуктивными связями по путям замыкания потока за пределами магнитопровода.
9. Разработан метод реализации функций частотных характеристик комплексных сопротивлений, в котором предложено перейти от реализации функции двух независимых переменных $Z(p) = Z(j\omega) = R(\omega) + jX(\omega)$ к реализации двух независимых функций одной переменной $Z_R(\omega) = R(\omega)$ и $Z_X(\omega) = X(\omega)$, и который исключает необходимость аппроксимации $Z(p)$ как отношения двух полиномов, не имеющих общих корней.
10. Корректное использование методов теории расчета цепей с сосредоточенными параметрами позволяет проводить анализ параметров электромагнитных процессов в конкретных точках объекта с распределенными параметрами при наличии взаимной индукции между его продольными элементами. Имеющиеся в мировой технической литературе публикации об электромагнитных процессах в крупных трансформаторах при внутренних резонансах не могут быть признаны как достоверные, если их результаты получены с использованием теории расчета электрических цепей с сосредоточенными параметрами без внесения необходимых корректив.

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.: 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 система (СИ-ГРЭ-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 / «CIGRE», Apr. 2014.
10. Electrical Transient Interaction Between Transformers and the Power System. P. 2. Case studies. Joint Working Group A2/C4.39, Brochure 577B / «CIGRE», Apr. 2014.
11. Dommel H.W. Electromagnetic Transients Program. Reference Manual. (EMTP Theory Book). – Portland, OR: Bonneville Power Administration, 1986.
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. – 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 // Int. Conf. Power Systems Transients. – Lyon, France, Jun. 4–7, 2007. – P. 6.
14. 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.
15. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники, электрические цепи. 8-е изд. – М.: Высшая школа, 1984. – 560 с.
16. 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.
17. 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.
18. 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.
19. 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.
20. Сегеда М.С., Черемних Є.В., Мазур Т.А. Математичне моделювання вільних коливань напруги в обмотках трансформаторів з урахуванням взаємодукції між витками під час імпульсних перенапруг // Науковий бюлетень Дніпропетровськ НГУ. – 2013. – № 1. – С. 68–76.

Поступила 20.08.0214 г.

UDC 621.3.013.62;621.314.21;621.314.222.8

METHODS OF RESEARCHING ELECTROMAGNETIC PROCESSES IN TRANSFORMER WINDINGS INFLUENCED BY POWER SYSTEM OVERVOLTAGE

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. At the present stage of development of CIS countries network the first-priority problem is the increase of operation reliability of transformers, the main part of which has been out of date long ago.

The main aim of the study is to state the main reasons of discrepancy between the research methods and the essence of the problem, which is under study, and to establish possible areas of improvement.

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

The results. The reason of discrepancy between the used research methods and the essence of the problem is the assumption of possibility to consider electrical and magnetic fields of the single electromagnetic field separately. The combined consideration of the single electromagnetic field shows the distributed parameter line (which is represented by the windings and their parts) is heterogeneous.

Conclusions. Adequate representation of real physical processes in transformer windings by mathematical models is impossible without modeling both intrinsic leakage resistance of windings and their parts and mutual induction resistance between these parts, taking into consideration the failure of reciprocity principle of mutual induction in real transformers. The authors have developed the method of implementing the functions of complex impedance frequency characteristic. The method proposes to move from implementation of function of two independent variables $Z(p)=Z(j\omega)=R(\omega)+jX(\omega)$ to implementation of two independent functions of one variable $Z_r(\omega)=R(\omega)$ and $Z_x(\omega)=X(\omega)$. The method also eliminates the need for $Z(p)$ approximation as a ratio of two polynomials, which do not have common roots. The correct usage of the methods of the calculation theory for electric circuit with lumped parameters allows analyzing the parameters of electromagnetic processes in specific points of the object with distributed parameters involving the interaction between its longitudinal elements. The existing world technical publications about electromagnetic processes in large transformers at internal resonances, cannot be called trustworthy, if the results described were obtained using the calculation theory of electric circuit with lumped parameters without adding the necessary corrections.

Key words:

Transformer, resonance overvoltage, electromagnetic processes, longitudinal insulation, turns insulation.

REFERENCES

- Bessonov L. *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki. Elektromagnitnoe pole* [Theory of electrotechnology. Electromagnetic field]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1986. 8th ed., revised and updated. 263 p.
- Vasyutinsky S. *Voprosy teorii i rascheta transformatorov* [Problems of transformer theory and computation]. Leningrad, Energiya Publ., 1970. 432 p.
- 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.
- 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, 1985. 61 p.
- GOST 1516.2–97. *Mezhgosudarstvenny standart. Elektrooborudovanie i elektroustanovki peremennogo toka na napryazhenie 3 kV i vysh. Obshchie 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.
- Rukovodstvo po zashchite elektricheskikh setey 6–1150 kV ot grozovykh i vnutrennikh perenapryazheniy. RD 153-34.3-35.125-99. 2-e izd. Utverzhdeno Pervym zamestitelem 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, second edition, approved by the first vice-chairman of the board of «RAO EES Russia» O. Britvin 12.07.1999]. St-Petersburg, PEIPK Publ. house, 1999. 333 p.
- GOST 1516.3–96. *Mezhgosudarstvenny 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.
- 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. Lizunov, A. Lokhanin. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986. 420 p.
- Electrical Transient Interaction between Transformers and the Power System. P. 1. Expertise.* Joint Working Group A2/C4.39, Brochure 577A / CIGRE, Apr. 2014.

10. *Electrical Transient Interaction between Transformers and the Power System. P. 2. Case studies*. Joint Working Group A2/C4.39, Brochure 577B / CIGRE, Apr. 2014.
11. Dommel H.W. *ElectroMagnetic Transients Program. Reference Manual. (EMTP Theory Book)*. Portland, OR, Bonneville Power Administration, 1986.
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.*, Mar./Apr. 1975, vol. PAS-94, no. 2, P. 1, pp. 561–575.
13. Gustavsen B., Mo O. Interfacing convolution based linear models to an electromagnetic transients program. *Int. Conf. Power Systems Transients*. Lyon, France, Jun. 4–7, 2007. pp. 6.
14. Buchkovsky I., Molnar M., Nykonets A., Nykonets 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]. Monography. Ed. by L. Nykonets. Lviv, Ukrainian technologies Publ., 2012. 167 p.
15. Bessonov L. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki, elektricheskie tsepi* [Theory of electrotechnology, electrical circuits]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1984. 8th ed. 560 p.
16. Sabat M., Nykonets A., Venger V., Venger V. 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.
17. Nykonets L., Sabat M., Buchkovsky I., Buchkovsky R., Nykonets A., Venger V., Venger V. Raspredeleniye vozdeystvuyushchikh na transformator napryazheniy vdol obmotki VN [Voltage distribution influencing a transformer along high voltage winding]. *Elektricheskie stantsii*, 2014, no. 2, pp. 51–56.
18. Nykonets A., Venger V., Venger V. 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.
19. Kirilenko O.V., Segeda M.S., Butkevich O.F., Mazur T.A. *Matematychni modelyuvannya v elektroenergetytsi* [Mathematical modelling in power engineering]. Lviv, National university «Lviv Polytechnic» Press, 2010. 608 p.
20. Segeda M.S., Cheremnyh E.V., Mazur T.A. Matematychni modelyuvannya vilnykh kolyvan napругy v obmotkakh transformatoriv z urakhuvanniam vzaeminduktzii 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.

Received: 20 August 2014.