УДК 621.3.013.62; 621.314.21; 621.314.222.8

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ОБМОТКАХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПРИ ДЕЙСТВИИ НА НИХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ СЕТИ

Никонец Леонид Алексеевич,
д-р техн. наук, проф., проф. кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий, городов и сельского хозяйства» Национального Университета «Львовская политехника», Украина, 79013, г. Львов, ул. С. Бандеры, 12. E-mail: nykonets@gmail.com

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

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

Актуальность работы. *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: *сформулировать основы моделирования, гарантирующие адекватность воспроизведения электромагнитных процессов в обмотках трансформаторов при действии на них перенапряжений сети.*
Методы исследования: *частотные методы натурного эксперимента и анализа электрических цепей.*
Результаты. *Сформулированы основные требования к моделям: 1. Расчетная схема должна содержать элементы, моделирующие магнитопровод, изоляцию, обмотки или их части и их взаимосвязи с общим магнитным потоком. 2. Расчетная схема должна отражать электромагнитные процессы при действии на трансформатор напряжений произвольной формы и частоты. 3. Поскольку составляющие общего магнитного потока (магнитный поток в магнитопроводе и магнитный поток вне магнитопровода) по-разному влияют на параметры электромагнитных процессов в трансформаторе, эти составляющие в модели должны учитываться отдельно.*
Выводы. *При резонансе трансформатора с линейными параметрами с емкостью, в том числе сети, в которую трансформатор передает энергию, распределение напряжения вдоль обмотки и между обмотками нелинейно. Задача моделирования – определить кратности перенапряжения на наиболее опасном участке обмотки. Под действием стороннего магнитного потока в отключенных обмотках и их частях развиваются резонансные процессы с частотой, зависящей от параметров обмоток или их частей, что при моделировании должно быть учтено организацией соответствующих взаимоиндуктивных связей по путям замыкания магнитных потоков вне магнитопровода. Разработан метод моделирования взаимоиндуктивных связей между обмотками и их частями, который учитывает нарушение принципа взаимности взаимоиндукции в реальных трансформаторах. Разработан метод учета нелинейности магнитопровода, при действии на трансформатор перенапряжений сети. Разработан метод экспериментального определения составляющих комплексного сопротивления обмоток и их частей для заданного режима работы и метод реализации частотных характеристик составляющих комплексного сопротивления. Стандартные программные комплексы, с помощью которых реализуются разработанные модели, в том числе и такие, которые учитывают геометрию трансформатора, не приспособлены для реализации подходов, изложенных в настоящих выводах. Проблема повышения надежности трансформаторов при возникновении резонансных процессов – это проблема не CIGRE, а IEC.*

Ключевые слова:
Трансформатор, резонансные перенапряжения, электромагнитные процессы, продольная изоляция, частотный метод исследования, модель.

Анализ результатов выполненных исследований по изучению явлений внутреннего резонанса и методам его моделирования

В 2014 г. рабочая группа A2/C4.39, обобщая результаты проведенных в мире исследований, выпустила уникальную монографию «Электрические переходные взаимодействия между трансформаторами и энергосистемой» (ч. 1, 2) [1, 2] от имени всей рабочей группы. Ее уникальность состоит в том, что число авторов из разных стран составило 24 плюс 13 авторов-корреспондентов. Всего 37 авторов. Часть 1 (экспертиза) [1] насчитывает 175 страниц, а часть 2 (истории успеха) – 123 страницы [2]. Всего 298 страниц. Эта монография имеет 402 библиографические ссылки! Поскольку в монографии не указан вклад отдельных авторов, ее выводы следует признать выводами всей рабочей группы. В одной трети из 402 публикаций принимали участие авторы [1, 2]. Таким образом имеется представительная выборка авторов, которая отражает мнение ученых всего мира за 50 лет исследований. В [1] авторы следую-

щим образом сформулировали основные выводы своей работы:

1. Контрольные испытания, содержащиеся в стандартах, не полностью соответствуют всем типам переходных процессов, возникающих в эксплуатации. Использование стандартной волны грозового импульса не соответствует реальным воздействиям в случае возникновения в эксплуатации высокочастотных колебательных процессов, например, при наличии в цепи питания кабелей, коммутации конденсаторов и т. д.
2. Производители и покупатели трансформаторов предложили, чтобы проблемы высокочастотных колебаний были рассмотрены в стандартах на импульсные воздействия. Это не тот случай. Не все опасные воздействия известны.
3. Другие рабочие группы решили эту проблему [3–14], но она по-прежнему требует внимания.
4. Для определенной конфигурации сети существует высокая вероятность того, что система может содержать, при переходных процессах, колебательные волны напряжения, частота которых будет совпадать с частотами собственных колебаний в трансформаторе. Эти внутренние перенапряжения могут превышать допустимые для изоляции значения, даже в случаях, когда амплитуда падающего напряжения гораздо ниже уровня защиты от перенапряжения. Что касается конструкции трансформатора, то этот тип уязвимости не может быть предотвращен.
5. Трансформатор влияет на форму волны переходного напряжения на выводах из-за частотной зависимости входного сопротивления. Поэтому при моделировании следует применять соответствующую модель. Есть несколько различных подходов и уровней сложности для получения таких моделей. Производители, как правило, создают модели для изучения внутренних перенапряжений в обмотках на основе информации о геометрии и свойств материалов. Другие создают модели на основе измерений на клеммах. Большинство моделей совместимы с распространенными программами моделирования электрических цепей.
6. Для представления прилегающей энергосистемы в исследованиях трансформаторных перенапряжений стандартные средства моделирования обеспечивают достаточно точными моделями для большинства ситуаций.
7. Стандартный подход для оценки последствий внутренних перенапряжений в трансформаторе заключается в использовании инструментов анализа и информации о конструкции, которая доступна только производителю. Системная программа для трансформатора может сделать первоначальную оценку, используя так называемый фактор серьезности частотных характеристик (частотной области), который получают симуляциями во времени (временной области) на модели трансформаторов (созданной относительно выводов). Этот подход (FDSF) может быть использован для обоснования расчетных видов перенапряжений и в анализе отказов. В сочетании с онлайн мониторингом он также может быть использован в качестве индикатора увеличенных рисков при воздействии перенапряжений.
8. Повторяющиеся перенапряжения и старение снижают способность изоляции выдерживать перенапряжения, что должно учитываться при проектировании изоляции. Аварийные характеристики изоляции из твердых материалов при высокочастотных воздействиях неизвестны и заслуживают дальнейшего изучения.
9. Тринадцать тематических исследований представлены в части 2 «Истории успеха», которые демонстрируют ситуации, когда переходные процессы приводят к чрезмерным перенапряжениям в трансформаторах. Эти исследования ясно показывают важность рассмотрения не только амплитуды, но и частоты воздействующих перенапряжений.
10. Для оценки эффективности моделей типа «белый ящик» при расчетах распределения внутренних напряжений различных типов переходных процессов относительно выводов обмоток был использован «фиктивный» (виртуальный) трансформатор с заданной геометрией конструкции. Результаты моделирования получены от 11 независимых сторон (производители, университеты, консультанты). Эти результаты дали хорошее совпадение максимальных значений внутренних перенапряжений, но некоторые различия были обнаружены в формах образовавшихся волн.
11. Резонансные частоты сильно зависят от значений индуктивностей, взаимоиндуктивностей и емкостей, которые были использованы для моделирования «фиктивного трансформатора». Некоторые участники, выполняя расчеты, использовали одни и те же значения индуктивностей и емкостей. В этом случае идентичные результаты были получены, используя различные комплексы программного обеспечения.
12. Производители должны улучшить свои модели для того, чтобы добиться более точных значений максимума внутренних перенапряжений по всей длине обмотки, а следовательно, и во временной области. Для улучшения моделей требуются более эффективные методы расчета индуктивностей и емкостей, эквивалентирующих обмотки трансформатора.
13. Хорошая работа внешней системы и практика проектирования могут помочь предотвратить повреждения трансформаторов, связанные с переходными процессами, но для этого очень важно, чтобы структура изоляции трансформаторов учитывалась при расчете переходных процессов. Это может быть достигнуто путем записи в технические условия при изготовлении специальных дополнительных требований (например, специальные испытательные на-

пряжения). Это требует сотрудничества между производителем и покупателем. При таком сотрудничестве желательно, чтобы производители представляли потребителю относительно выводов трансформатора соответствующий эквивалент (модель), чтобы потребитель мог выполнять исследование переходных процессов. Результатом таких исследований могут быть рекомендации небольших изменений в системе питания, которые позволят исключить возможность возбуждения в трансформаторе внутренних резонансов.

Поскольку монография [1, 2] представляет по сути обобщение всех исследований в мире, и ее содержание напрямую коррелируется с темой настоящего исследования, представляется целесообразным не ограничиваться выводами, которые сделали авторы, но дополнить их своими впечатлениями и замечаниями, появившимися после внимательного изучения всего текста.

1. Монография представляет хорошо сбалансированный текст, в котором рассмотрены *все* аспекты проблемы. Трудно представить 37 авторов из разных стран, у которых единая точка зрения. Чувствуется влияние редакторов, фамилии которых не указаны.
2. Настойчиво пропагандируется тезис о преимуществе производителя, который по сравнению с потребителем имеет доступ к геометрии трансформатора, а следовательно, только он способен сделать правильные выводы. Но внутренние сомнения у анонимных редакторов все-таки остаются. Выразителем этих сомнений является раздел 8, в котором приводятся параметры «фиктивного трансформатора» и излагаются результаты проведенного тестирования результатов расчетов, сделанных представителями 12 ведущих в трансформаторостроении (раздел 8.3) стран. Чего стоит, например, вывод 11 авторов [1, 2]. Из него можно понять, что не существует строго обоснованных методов определения значений индуктивности и емкости для моделирования обмоток. Если этот вывод прочитать совместно с выводом 12, то при желании можно сомневаться в достоверности результатов. Ведь такое тестирование потребовало весьма серьезных материальных затрат.
3. Рекомендации [1, 2] как рабочей группы CIGRE, с учетом ее статуса, относятся исключительно к сверхмощным трансформаторам на сверхвысокие напряжения, хотя естественно было бы предположить, что характер электромагнитных процессов у трансформаторов на любые номинальные напряжения, вплоть до трансформаторов распределительных сетей 10/0,4 кВ, одинаковый. С учетом сделанного выше замечания, трудно согласиться с утверждениями о том, что другие рабочие группы решили эту проблему (вывод 3 монографии), что этот тип воздействия не может быть предотвращен изменением конструкции трансформатора (вывод 4), что небольшие изменения в системе питания позволят исключить возможность возбуждения в трансформаторе внутренних резонансов (вывод 13).
4. Утверждение, с которого начинается Резюме [1. С. 6] «Ряд диэлектрических повреждений трансформаторов были отнесены к перенапряжениям как причине, даже в случаях, когда изоляция и ее координация с защитными устройствами была выполнена хорошо. Рабочая группа CIGRE РГ A2/C4.39 была сформирована с целью выяснения причин таких неудач, и рекомендация мер по исправлению положения, *в контексте высокочастотных переходных процессов* и практики выбора изоляции, выглядит, как попытка подменить проблему. Не решив одной, сформулировать другую (под высокочастотными переходными процессами авторы [1, 2] понимают частоты больше 1 МГц), может быть не менее важную.
5. В [1. С. 46–47], раздел 4.3.1 «Характеристика поведения трансформатора» указывается, что наиболее полную информацию можно получить с помощью матрицы полных проводимостей, которые определяют соотношения между токами и напряжениями на клеммах трансформатора

$$i(\omega)=Y(\omega)v(\omega). \qquad (4.3)$$

Далее указано: «стандартные измерительные системы FRA непосредственно не применимы для измерения $Y(\omega)$»… «В принципе, можно было бы измерить матрицу передачи напряжения от каждого вывода к другим выводам, на практике, однако, это невозможно, потому что входной импеданс сетевого анализатора 50 Ом изменит передаточные функции напряжения».

В разделе 4.3.5 (стр. 51), учитывая опыт, накопленный авторами при синтезе матрицы $Y(\omega)$, рекомендуются следующие этапы проверки:

- убедитесь, что измеренная матрица $Y(\omega)$ симметрична;
- убедитесь, что измеренная матрица $Y(\omega)$ пассивна;
- сравните экспериментальный результат с результатом, полученным с помощью модели.

Указанные требования соответствуют необходимости выполнения известного из ТОЭ принципа взаимности взаимных проводимостей в линейных цепях. Наличие специального подраздела 4.3.5 в монографии [1, 2] указывает на то, что авторы [1, 2] при синтезе матрицы $Y(\omega)$ регулярно сталкиваются с соответствующими сложностями.

6. В целом [1, 2] представляются нам как добросовестное уточнение ранее известных подходов, которые за более чем 50 лет исследований не сумели обеспечить качественный скачок наших знаний и решить проблемы повышения надежности работы витковой изоляции. За все увеличивающейся сложностью расчетов, возможность которых предоставляет нам «Компьютерная Эра», теряется понимание физики

процессов внутреннего резонанса. В частности, не ясно, что же в конце концов с чем резонирует? Какие условия должны сложиться, и на каких частотах возникнут резонансные явления? Это из ряда вон выходящее или банальное повседневное явление?

С 2005 г. начинаются исследования внутреннего резонанса на Украине [15].

В [16] впервые установлен механизм возникновения перенапряжений между частями обмотки трансформатора – резонанс между напряжениями взаимоиндукции 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 бóльшие, чем приложенные.

В [17] исследовалось распределение напряжения вдоль обмотки высокого напряжения (ВН) в диапазоне частот 50–100000 Гц и обоснована необходимость использования для учета влияния взаимоиндукции 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.

В [19] сформулированы причины несоответствия используемых наукой методов исследования существу исследуемой проблемы и обоснованы возможные направления по усовершенствованию методов исследования.

Задача исследований

Сформулировать основы моделирования, гарантирующие адекватность воспроизведения электромагнитных процессов в обмотках трансформаторов при действии на них перенапряжений сети.

Изложение основных результатов исследования

Основные требования к моделям

При обосновании требований к параметрам расчетной схемы и её элементам необходимо учесть следующие условия:

1. Расчетная схема должна содержать элементы, моделирующие магнитопровод, изоляцию, обмотки или их части и их взаимосвязи с общим магнитным потоком.
2. Расчетная схема должна отражать электромагнитные процессы при действии на трансформатор напряжений произвольной формы и частоты.
3. Поскольку составляющие общего магнитного потока (магнитный поток в магнитопроводе и магнитный поток вне магнитопровода) по-разному влияют на параметры электромагнитных процессов в трансформаторе, эти составляющие в модели должны учитываться отдельно.

Метод моделирования резонансных процессов в обмотках трансформатора под действием стороннего магнитного потока

С видом перенапряжений, задекларированном в заголовке, электроэнергетика еще не сталкивалась по причине его неизвестности. Соответственно отсутствуют любые предложения о возможных методах его моделирования. Хотя выполнить экспериментальные исследования мог бы любой студент в любом вузе, самое трудное, что надо было сделать, это догадаться, что такой эксперимент надо провести. Сказанное выше в равной степени относится и к экспериментально установленному факту нарушения принципа взаимности взаимоиндукции, уже начиная с частоты 50 Гц. Реальное влияние электромагнитного поля (не отдельно магнитного и отдельно электрического) оказалось много сложнее, чем предполагали исследователи. Без описания и моделирования этого явления невозможно в будущем обеспечить надежную работу продольной изоляции трансформатора в эксплуатации. Традиционная модель [1, 2] предусматривает наличие магнитной связи между обмотками и магнитопроводом, а также сопротивлений рассеяния обмоток трансформатора. Опыты, результаты которых приведены в [18], показывают, что на высоких частотах магнитная связь между обмотками и их частями осуществляется в основном по путям замыкания магнитных потоков вне магнитопровода. Без моделирования этих связей нельзя признать ни одну модель адекватной.

Модели сопротивлений рассеяния по своему определению работают, если через них протекает ток, что возможно, если к модели обмотки подключен источник напряжения или нагрузка. На величину стороннего магнитного потока, пересекающего обмотку, модели сопротивлений рассеяния реагировать не имеют права!

Из изложенного следует, что стандартные модели трансформаторов должны быть дополнены подмоделями, которые отражают наличие взаимоиндуктивных связей между обмотками и их частями. Главный вопрос – сколько таких связей необходимо, чтобы отобразить все опасные для продольной изоляции воздействия.

Для ответа на сформулированный вопрос необходимо проанализировать конструкцию трансформатора и его возможные нормальные и аварийные режимы работы. Если взять за основу трансформатор распределительной сети, для которого были проведены основные экспериментальные исследования, то структурная схема модели трансформатора представлена на рис. 1. Здесь: M_{1i} – взаимоиндукция между i-м участком модели обмотки ВН и обмоткой низкого напряжения (НН) соответствующих фаз; M_{2i} – взаимоиндукция между i-м участком модели обмотки ВН одной фазы и

моделью обмотки ВН другой фазы; M_3 – взаимоиндукция между моделями обмотки НН разных фаз; M_4 – взаимоиндукция между регулировочной и основной частью моделей обмотки ВН соответствующих фаз; M_5 – взаимоиндукция между моделью регулировочной части обмотки ВН и моделью обмотки НН соответствующих фаз; M_6 – взаимоиндукция между моделями регулировочных частей обмотки ВН соответствующих фаз; M_7 – взаимоиндукция между моделями основной части обмотки ВН и обмоткой НН.

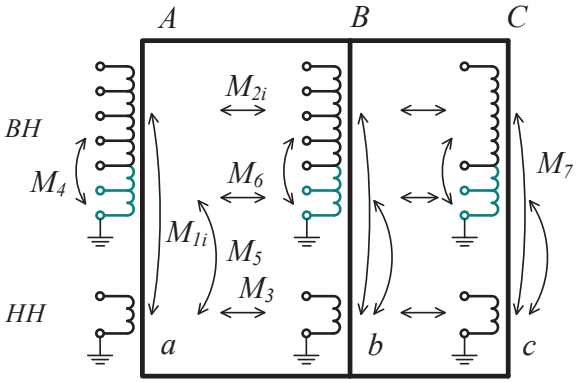


Рис. 1. *Структурная схема модели трансформатора*

Fig. 1. *Structural diagram of a transformer model*

Трансформатор может находится в режиме холостого хода. Для этого режима необходимо отобразить возможность появления перенапряжений на отключенной обмотке НН при помощи модели взаимоиндукции M_7. Если в режиме холостого хода не используются витки регулировочной части обмотки ВН для моделирования возможных перенапряжений на них предусмотрена взаимоиндукция M_4. Если предполагается возможность включения трансформатора на холостой ход со стороны обмотки НН, должны быть использованы модели M_{1i}, M_5.

Кроме упомянутых режимов следует считаться и с аварийным. Такие трансформаторы обычно подключают к сети через предохранители. Наличие режима работы трансформатора при перегоревших одном или двух предохранителях требует учета взаимоиндуктивностей M_{2i}, M_3.

Наличие взаимоиндуктивных связей может привести к большим перенапряжениям на отключенных обмотках или на их частях, при включении трансформатора на холостой ход из-за бросков тока холостого хода, которые могут превышать номинальные значения. Этот вопрос подлежит дальнейшему изучению.

Значимость каждой из перечисленных взаимоиндуктивных связей и необходимость учета в модели должна быть установлена по результатам экспериментальных исследований в каждом конкретном случае (с учетом цели проводимых исследований). Важно подчеркнуть, что экспериментально определенные значения M для разных частот напряжения источника питания, являются параметрами *модели*, а не оригинала. Эти значения M *корректно* отражают сложнейшие резонансные процессы в *отключенных* обмотках оригинала под действием магнитных потоков, сформированных токами в других обмотках, в терминах и представлениях (понятиях) теории расчета цепей с сосредоточенными параметрами. Сами экспериментально определенные частоты, для которых значения M достигают максимума, уже несут важную практическую информацию об опасных частотах.

Учет нарушения принципа взаимности взаимоиндукции

В [19] на основе экспериментов обосновано нарушение принципа взаимности взаимоиндукции в реальных трансформаторах, что автоматически приводит к нарушению принципа взаимности взаимных проводимостей в линейных цепях. В свою очередь это означает, что требования раздела 4.3.5 [1] о необходимости формирования матрицы проводимостей $Y(\omega)$, как симметричной, так и пассивной, некорректны, а следовательно, все модели, отвечающие требованиям раздела 4.3.5 [1] – *неадекватны*.

На рис. 2 представлен фрагмент модели реального трансформатора, отражающий наличие взаимоиндуктивной связи между конкретными обмотками или их частями, при условии $X_{m12}\neq X_{m21}$. Магнитную связь обмоток 1 и 2 с потоком, который замыкается по магнитопроводу, обеспечивает модель реального трансформатора. Магнитную связь между обмоткой – 1, по которой протекает ток $\dot{I}_1$, и обмоткой – 2 по путям замыкания потока вне магнитопровода обеспечивает идеальный трансформатор – 1 с нагрузкой $X_{m12}(\omega)$. Магнитную связь между обмоткой – 2 и обмоткой – 1 – соответственно идеальный трансформатор – 2 с нагрузкой $X_{m21}(\omega)$. Для устранения взаимного влияния идеальных трансформаторов параллельно вторичной обмотке трансформатора – 1 включен контролируемый источник тока $\dot{I}_2$ и наоборот, параллельно вторичной обмотке трансформатора – 2 – контролируемый источник тока $\dot{I}_1$. Алгоритм рекурсивных сверток для симулирования электрических цепей во времени представлен в [20].

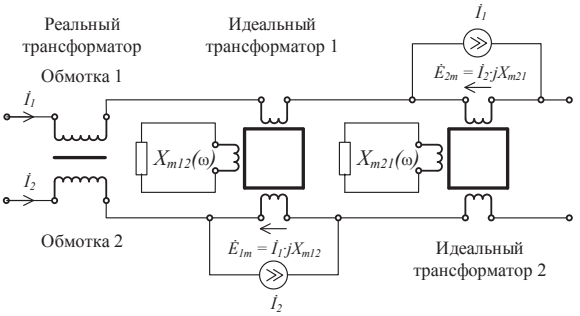


Рис. 2. *Фрагмент модели реального трансформатора, отражающий наличие взаимоиндуктивной связи между конкретными обмотками или их частями, при условии* $X_{m12}\neq X_{m21}$

Fig. 2. *Segment of the real transformer model. It reflects the occurrence of mutual inductive coupling between concrete windings or their parts at* $X_{m12}\neq X_{m21}$

Учет нелинейности характеристик магнитопровода

Общим требованием при моделировании является необходимость учета нелинейных свойств магнитопровода трансформатора. Известные авторам методы рассчитаны на действие напряжения с заданной частотой. В нашем случае перенапряжения на обмотках никогда не появятся, если трансформатор отключен. Таким образом, необходимо считаться с ситуацией, при которой на магнитную систему трансформатора влияют соизмеримые по величине напряжения разных частот.

При этом рабочая точка на кривой намагничивания определяется величиной напряжения 50 Гц в момент возникновения перенапряжения. Если частота перенапряжений большая, например 5 кГц, а амплитуда перенапряжений равна амплитуде номинального напряжения 50 Гц, то изменение величины магнитной индукции в установившемся режиме работы должно составить 1 % от номинального значения индукции с частотой 50 Гц. Здесь также надо учесть инерцию в изменении магнитного потока в переходном режиме. Известно, что постоянная времени τ в магнитных цепях на несколько порядков больше τ для силовых электрических цепей. Если дополнительно учесть, что внутренние перенапряжения появляются в момент, близкий к максимуму значения напряжения 50 Гц (что соответствует нулевому значению магнитного потока), то напрашивается вывод, что экспериментальные частотные характеристики, снятые на напряжении до 1000 В, будут мало отличаться от характеристик при реальных воздействиях в эксплуатации.

По мере уменьшения частоты воздействующего перенапряжения степень его влияния на величину магнитного потока будет возрастать. Нам неизвестны технические решения в существующих моделях по учету влияния амплитуды и частоты воздействующего перенапряжения на величину магнитного потока в магнитопроводе. Как правило, в действующих моделях характер вебер-амперной характеристики задается частотой источника питания. Если дополнительно появляется источник возмущения с другой частотой, то адекватной реакции модели ожидать не приходится.

Диапазон частот, в пределах которого желательна корректировка вебер-амперной характеристики, соответствует диапазону частот, в пределах которого магнитопровод участвует в передаче энергии между обмотками трансформатора. Таким следует считать диапазон от 50 Гц до частоты, соответствующей точке пересечения характеристик холостого хода и короткого замыкания трансформатора.

В общем случае, при заданной амплитуде воздействующего перенапряжения, амплитуда магнитной индукции в магнитопроводе должна изменяться обратно пропорционально частоте воздействующего напряжения. Любое воздействие произвольной формы можно разложить в ряд Фурье, каждая составляющая которого подчиняется вышеописанному закону.

Определение закона изменения вынужденной составляющей магнитной индукции магнитопровода при воздействии на трансформатор, подключенный к сети 50 Гц, возмущающего импульса произвольной формы, предлагается производить в соответствии со схемой рис. 3. На рис. 3 $e(t)$ – зависимость импульса возмущения от времени; $E(50)$ – напряжение сети 50 Гц; R и X_c – параметры схемы, связанные между собой соотношением $\omega RC>>1$. Тогда на выходе схемы рис. 3 будет получено напряжение $u(t)$, эквивалентное изменению напряжения 50 Гц, по значению которого можно определить зависимость изменения индукции или потокосцепления $B(t)$. Ставя в соответствие значения $B(t)$ для заданного момента времени t_i значению необходимой для заданного магнитопровода магнитодвижущей силы (м.д.с.) можно получить требуемое значение суммы ампервитков всех обмоток трансформатора в данный момент времени.

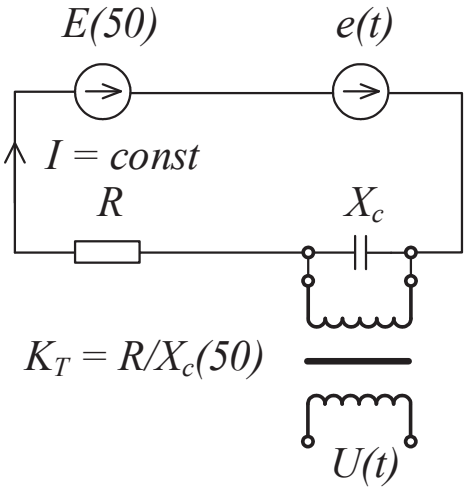


Рис. 3. *Схема для определения закона изменения магнитной индукции в магнитопроводе трансформатора при действии на него возмущающего импульса перенапряжений e (t)*

Fig. 3. *Circuit for determining the law of variation of flux density in the transformer core under overstress pulse disturbance e (t)*

Учет неравномерности распределения полей рассеяния

С использованием метода [19] проведены экспериментальные исследования и определены частотные характеристики активных и реактивных составляющих сопротивлений моделей регулировочной и основной части обмотки ВН, а также обмотки НН трансформатора, разработан метод их реализации.

Было проведено две независимые серии опытов по определению значений составляющих расчетных сопротивлений основной части обмотки ВН и обмотки НН, а также регулировочной и основной части обмотки ВН (при наличии взаимоиндуктивности между соответственно основной частью обмотки ВН и обмоткой НН, а также между основной и регулировочной частями обмотки ВН). Метод позволяет по данным эксперимента непосредственно

определить зависимость активной мощности, получаемой от источника питания, и зависимость реактивной мощности, генерируемой конденсатором для компенсации потерь реактивной мощности в трансформаторе, от частоты.

На рис. 4 приведены результаты измерения распределения напряжения вдоль основной части обмотки ВН для резонансных частот между трансформатором и конденсатором, подключенным со стороны обмотки НН. Методика измерений приведена в [17]. Объединяет все кривые рис. 4 один общий фактор: по обмотке ВН трансформатора протекает ток, фаза которого совпадает с фазой, приложенной к трансформатору ЭДС. Как видно из рис. 4, распределение напряжения вдоль обмотки неравномерное. Степень неравномерности и ее характер зависят от частоты напряжения питания. В общем случае напряжение на участке обмотки – это векторная сумма ЭДС $\Delta\dot{E}_i$ участка обмотки, наводимой основным магнитным потоком, и падения напряжения $\Delta\dot{U}_i$ на сопротивлении рассеивания участка от протекания по нему активной составляющей тока. От соотношения этих составляющих зависит и характер распределения. Если $\Delta\dot{U}_i << \Delta\dot{E}_i$, то распределение равномерное, и наоборот.

Как видно из рис. 4, наиболее опасным с точки зрения увеличения градиентов напряжения на отдельных участках обмотки ВН данного трансформатора диапазоном частот является диапазон 4–69 кГц, который совпадает с диапазоном максимальных значений $R_{(ВН+НН)}$, рис. 5. При более высоких частотах распределение напряжения приближается к равномерному.

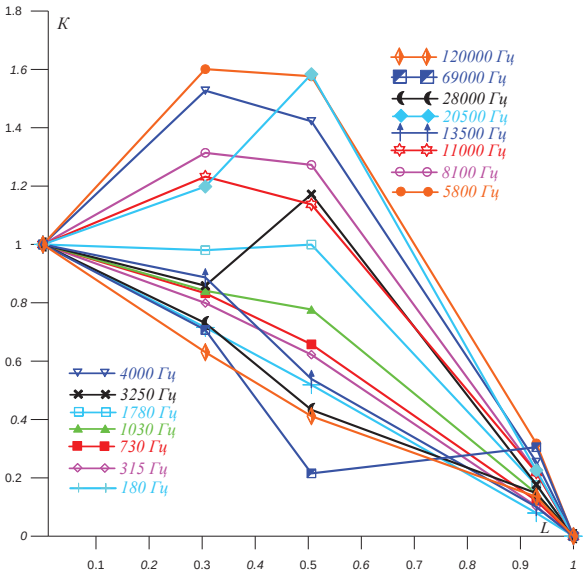


Рис. 4. *Распределение напряжения вдоль основной части обмотки ВН для резонансных частот между трансформатором и конденсатором, подключенными со стороны обмотки НН*

Fig. 4. *Stress distribution along the main part of high voltage (HV) winding for resonant frequencies between a transformer and a condenser connected from low voltage (LV) winding*

Рис. 4 – наглядный неопровержимый экспериментальный факт, подтверждающий выдвинутое в [19] положение о необходимости кардинального пересмотра теории полей рассеяния трансформатора, т. к. существующая теория не в состоянии объяснить факт неравномерного распределения напряжения вдоль обмотки трансформатора. Важно также, что во всем диапазоне частот сопротивление трансформатора в целом носит активно-индуктивный характер. На рис. 5 представлены зависимости активных и реактивных составляющих суммарных сопротивлений основной части обмотки ВН и обмотки НН трансформатора, приведенных к напряжению источника питания от частоты напряжения источника питания.

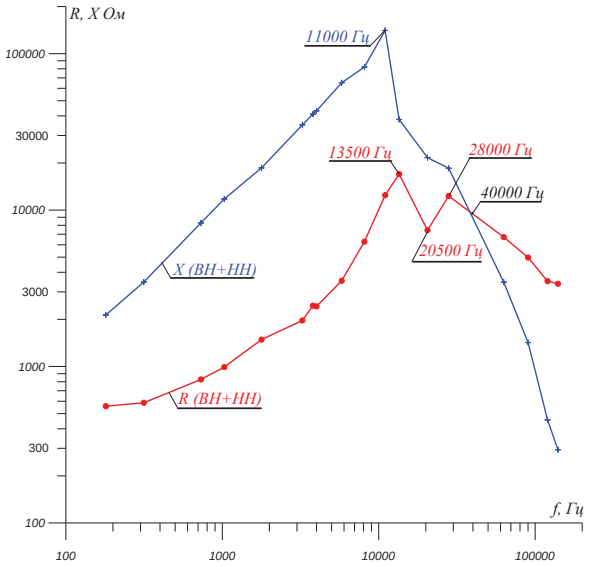


Рис. 5. *Зависимости активной и реактивной составляющих суммарных сопротивлений обмоток ВН и НН трансформатора, приведенных к напряжению источника питания от частоты напряжения источника питания*

Fig. 5. *Dependence of active and reactive components of overall resistances of HV and LV windings of the transformer reduced to the power supply voltage on voltage frequency of the power supply voltage*

Насколько нам известно, представленная на рис. 5 зависимость $R_\Sigma(f)$ – первая попытка экспериментального определения характера изменения активного сопротивления обмоток трансформатора от частоты. Как видно из рис. 5, зависимость $R_\Sigma(f)$ обмоток ВН и НН монотонно увеличивается до частоты 13,5 кГц, что не противоречит общепринятым представлениям. Начиная с частоты 13,5 до 20,5 кГц имеет место резкое снижение значения сопротивления. В этом диапазоне частот в обмотке ВН трансформатора происходит основная масса резонансных явлений, которые кардинально меняют характер протекания тока внутри обмотки. Аналогичный процесс возникает и вблизи частоты 28–30 кГц, но с относительно меньшими амплитудами перенапряжений.

В [1. С. 42–43] констатируется: «Потери играют важную роль в точной имитации распределе-

ния напряжений...» и приводятся формулы (4.12), (4.13), с помощью которых следует учесть влияние частоты на величину активных сопротивлений, которые должны увеличиваться пропорционально $\sqrt{\omega}$. Результаты экспериментальных исследований рис. 5 доказывают несостоятельность рекомендаций [1]. Одно дело – потери в проводе, развернутом в длину, другое дело, когда из этого провода сделана обмотка!

Проведенные опыты показали, что потери реактивной мощности в магнитопроводе трансформатора для резонансных режимов не превышают 0,1–0,5 % мощности, генерируемой конденсатором, и этими потерями можно пренебречь. Тогда вся реактивная мощность, генерируемая конденсатором, должна расходоваться на потери в реактивных сопротивлениях обмоток. Как видно из рис. 5, зависимости $X_\Sigma(f)$ качественно похожи на зависимости $R_\Sigma(f)$. Принципиально новым явлением на наш взгляд здесь есть характер изменения суммарной индуктивности рассеяния после частоты 11 кГц (рис. 5). Уменьшение значения индуктивности рассеяния после частоты 11 кГц обусловлено возникновением резонансных процессов между напряжениями взаимоиндукции частей обмотки ВН. При частотах 40–120 кГц суммарное сопротивление трансформатора имеет практически активный характер.

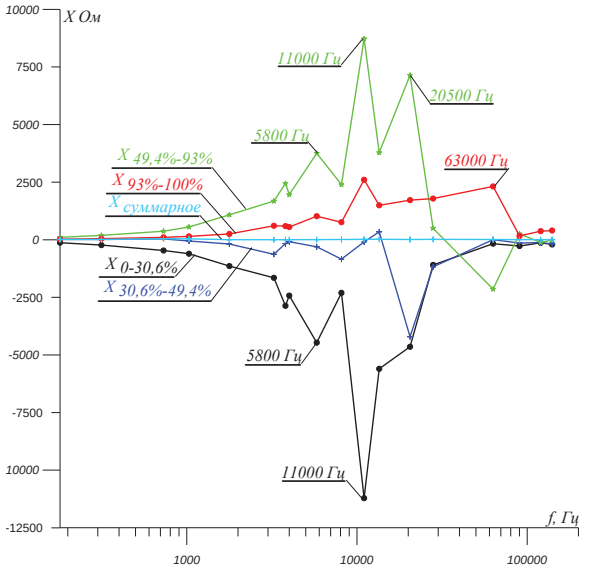


Рис. 6. *Зависимости реактивных составляющих сопротивлений модели участков основной части обмотки ВН от частоты источника питания*

Fig. 6. *Dependence of reactive components of the model resistance on the sections of the main part of HV winding on the power supply source frequency*

До сих пор мы рассматривали изменение суммарных потоков рассеяния. Для целей нашего исследования важно изучить распределение суммарного потока рассеяния между обмотками ВН и НН, а также между частями обмотки ВН. На рис. 6 представлена измеренная по методу [19] зависимость величины реактивных составляющих сопротивлений участков модели основной части обмотки ВН от частоты источника питания. Как видно из рис. 6, обмотка ВН имеет две примерно равные части, с противоположными по знаку значениями реактивных сопротивлений, которые для всей обмотки взаимно компенсируются. Таким образом, можно утверждать, что представленная на рис. 5 зависимость составляющей суммы реактивных сопротивлений основной части обмотки ВН и обмотки НН является расчетным индуктивным сопротивлением только обмотки НН.

На рис. 7 приведены зависимости активных составляющих сопротивлений модели участков основной части обмотки ВН и обмотки НН от частоты источника питания. Как видно из рис. 6 и 7, основные потери активной мощности трансформатора приходятся на обмотку ВН, а реактивной – на обмотку НН. Обмотка НН также в некоторой степени участвует в уравнительном обмене активной мощности между обмотками, и при частотах 1000–10000 Гц имеет место ее потребление в обмотке НН.

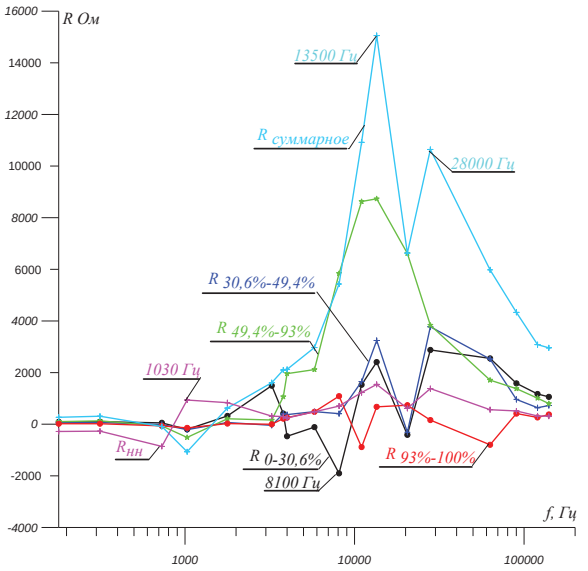


Рис. 7. *Зависимости активных составляющих сопротивлений модели участков основной части обмотки ВН и обмотки НН (приведенных к обмотке ВН) от частоты источника питания*

Fig. 7. *Dependence of active components of the model resistance on the sections of the main part of HV and LV windings (reduced to HV winding) on the power supply source frequency*

Принципиально важными результатом изложенного выше этапа исследований является характер изменения реактивной составляющей моделей расчетных сопротивлений обмоток. Как следует из рис. 5, 6, имеются широкие диапазоны частот, в пределах которых индуктивное сопротивление с ростом частоты должно уменьшаться по модулю, оставаясь индуктивным по характеру. И наоборот – емкостное сопротивление с ростом частоты должно увеличиваться. Реализация таких частотных характеристик в виде системы двухполю-

сников известными ТОЭ методами невозможна. Этого, к сожалению, не понимают авторы [1]. На рис. 4.5а [1. С. 37] приведена частотная характеристика обмотки НН трансформатора, а на рис. 4.5в – ее фазовые углы. Из рис. 4.5 следует, что на возрастающих участках сопротивление имеет активно-индуктивный характер, на участках, где сопротивление с ростом частоты уменьшается, – активно-емкостной. А в [1. С. 38, 39] излагается методика моделирования характеристики, чтобы модель обмотки соответствовала оригиналу.

Приведенные на рис. 5, 6 зависимости реактивных сопротивлений представляют собой так называемые расчетные значения для случаев одновременного протекания токов соответственно в обмотках ВН и НН.

Изменение состава обмоток или их частей, по которым в данном режиме протекают токи нагрузки, приводит к изменению расчетных сопротивлений рассеяния. Например, трансформатор работает в режиме холостого хода и подвергается воздействию перенапряжений. По условиям рабочего режима регулировочная часть обмотки ВН не задействована. Как следует из [18], наибольшие кратности перенапряжений развиваются на регулировочной части обмотки ВН, в результате на ее выводах произойдет короткое замыкание. При этом до отключения трансформатора из сети распределение на основной части обмотки ВН будет отличаться от представленного на рис. 4.

В соответствии с рекомендациями [19] были проведены опыты для определения суммарных активной и реактивной составляющих сопротивлений моделей частей обмотки ВН для вышерассмотренного режима, в зависимости от частоты источника питания. Распределение напряжений вдоль основной части обмотки ВН показано на рис. 8, а зависимости суммарных составляющих сопротивления – на рис. 9. Сравнение данных рис. 4 и 8 показывает, что распределение напряжений вдоль основной части обмотки ВН, в зависимости от частоты, изменилось существенно, хотя максимальные кратности перенапряжений остались на прежнем уровне. Здесь уместно обратить внимание на ранее неизвестный факт о том, что при резонансе трансформатора с *линейными* параметрами с внешней емкостью сети распределение напряжения вдоль обмотки ВН *нелинейно*! Таким образом основным фактором, который влияет на аварийность трансформатора, является не кратность перенапряжения вообще (которую все стремятся определить), а *кратность перенапряжений на наиболее опасном участке обмотки*, которая может быть в несколько раз больше. Именно это обстоятельство требует, в числе прочих, моделировать не всю обмотку, а разбивать ее на части.

Представленные на рис. 9 зависимости качественно не противоречат зависимостям рис. 5. Существенное увеличение модулей сопротивлений обусловлено разными номинальными мощностями обмотки НН (100 %) и регулировочной части обмотки ВН (8 %).

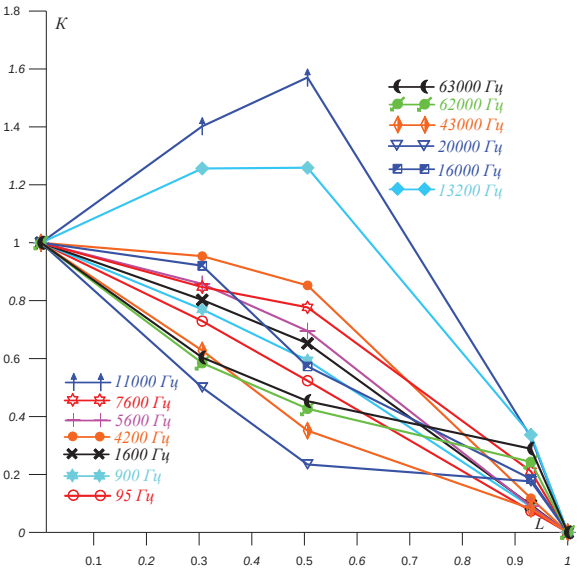


Рис. 8. *Распределение напряжения вдоль основной части обмотки ВН для резонансных частот между трансформатором и конденсатором, подключенным к регулировочной части обмотки ВН*

Fig. 8. *Stress distribution along the main part of the HV winding for resonant frequencies between a transformer and a condenser connected to the adjusted part of the LV winding*

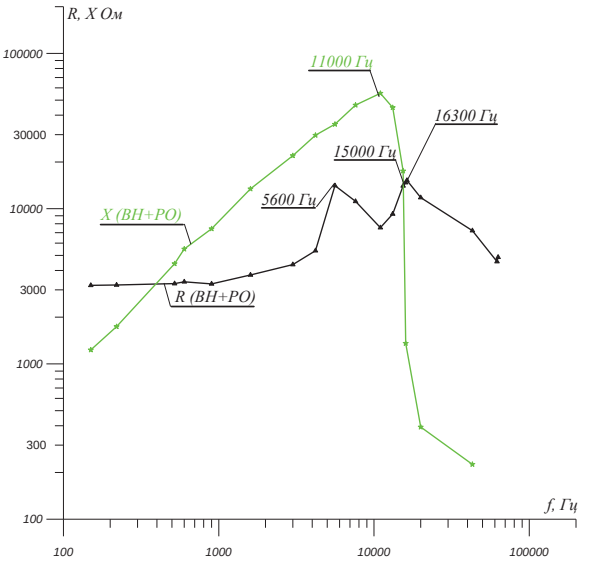


Рис. 9. *Зависимости активных и реактивных составляющих суммарных сопротивлений основной и регулировочной частей обмотки ВН трансформатора, приведенных к напряжению источника питания, от частоты напряжения источника питания*

Fig. 9. *Dependence of active and reactive components of the overall resistances of the main and adjusted parts of the transformer HV winding, reduced to the power supply source resistance on model resistance, on the power supply source frequency*

Моделирование функций частотных характеристик составляющих комплексных сопротивлений

Эффективный метод реализации функций частотных характеристик комплексных сопротивлений предложен в [19]. Этой проблеме в [1, 2] уделяется мало внимания. Просто утверждается, что имея матрицу проводимостей $Y(\omega)$, можно синтезировать модель. В целом, соглашаясь с этим утверждением, отметим, что оно не всегда правильное. В частности реализация частотной характеристики активных сопротивлений, определяемой по уравнениям (4.12, 4.13) в [1], ранее была принципиально невозможной.

С учетом вышесказанного проиллюстрируем эффективность предложенного в [19] метода на примере реализации суммарного активного сопротивления основной части обмотки ВН (рис. 7). Схема модели представлена на рис. 10. Параметры модели этого сопротивления приведены в таблице, а полученная и исходная характеристики представлены на рис. 11.

Таблица. *Значения параметров модели*

Table. *Values of the model parameters*

№ ячейки / Cell	L_i, Гн (H)	R_i, Ом (Ohm)	C_i, Ф (F)
1	5,00E-02	5725,00	2,78E-09
2	4,00E-02	4650,00	7,04E-10
3	8,00E-03	−3150,00	7,53E-09
4	5,00E-03	800,00	3,52E-10
5	5,00E-04	−325,00	2,45E-08
6	5,00E-02	581,00	4,80E-08
7	7,50E-02	−805,00	2,79E-07
8	1,00E-01	150,00	2,55E-06
9	7,60E-03	100,50	6,25E-06
10	3,05E-03	77,50	2,62E-06
11	5,00E-05	−82,50	8,01E-05
12	2,00E-03	−137,50	1,05E-07
13	1,75E-03	−3000,00	1,06E-07
14	5,00E-04	−550,00	1,75E-07
15	5,00E-05	−300,00	8,61E-07
16	5,00E-08	124,50	2,58E-05

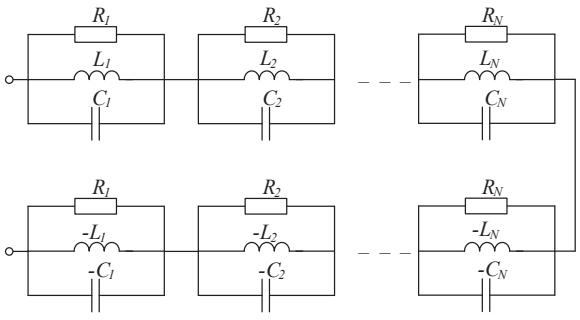


Рис. 10. *Модель двухполюсников, реализующих зависимость от частоты активной составляющей комплексного сопротивления обмотки ВН*

Fig. 10. *Model of two-pole networks implementing the dependence on the active component frequency of the complex resistance in HV winding*

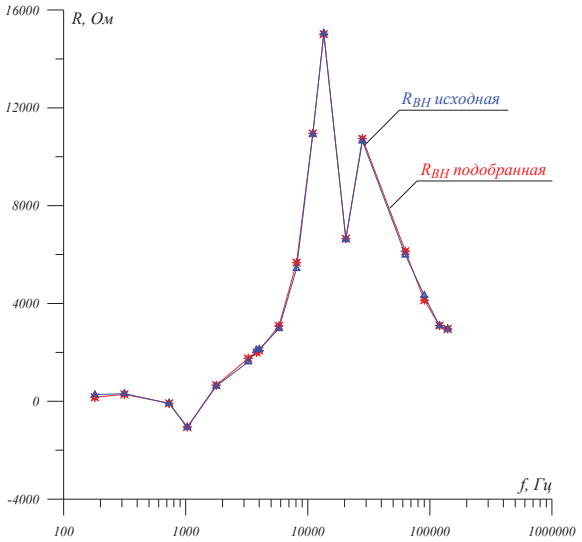


Рис. 11. *Сравнение частотных характеристик оригинала и модели активного сопротивления основной части обмотки ВН $R_{ВН}$*

Fig. 11. *Comparison of frequency characteristics of the original active resistance in the main part of the HV winding $R_{ВН}$ and its model*

Среднеквадратичная погрешность моделирования не превысила 3,3 %, что достаточно для практических целей.

Выводы

1. При резонансе трансформатора с линейными параметрами с емкостью, в том числе сети, в которую трансформатор передает энергию, распределение напряжения вдоль обмотки и между обмотками *нелинейно*. Задача моделирования – определить кратности перенапряжения на наиболее опасном участке обмотки.
2. Под действием стороннего магнитного потока в отключенных обмотках и их частях развиваются резонансные процессы с частотой, зависящей от параметров обмоток или их частей, что при моделировании должно быть учтено организацией соответствующих взаимоиндуктивных связей по путям замыкания магнитных потоков вне магнитопровода.
3. Разработан метод моделирования взаимоиндуктивных связей между обмотками и их частями, который учитывает нарушение принципа взаимности взаимоиндукции в реальных трансформаторах.
4. Разработан метод учета нелинейности магнитопровода, при действии на трансформатор перенапряжений сети.
5. Разработан метод экспериментального определения составляющих комплексного сопротивления обмоток и их частей для заданного режима работы и метод реализации частотных характеристик составляющих комплексного сопротивления при моделировании.

6. Параметры сети, питающей трансформатор, определяют формы и величины воздействующих на трансформатор перенапряжений, которые для конкретного трансформатора в основном стабильны, а параметры сети, в которую трансформатор передает электроэнергию, вместе с параметрами трансформатора – резонансные частоты, на которых возможно появление на элементах трансформатора опасных перенапряжений. Эти резонансные частоты будут меняться с изменением нагрузки трансформатора в широком диапазоне.
7. Стандартные программные комплексы, в том числе и коммерческие, с помощью которых реализуются разработанные модели, в том числе и такие, которые учитывают геометрию трансформатора, не приспособлены для реализации подходов, изложенных в настоящих выводах. Предстоит долгая работа по их адаптации.
8. Проблема повышения надежности трансформаторов при возникновении резонансных процессов – это проблема не CIGRE, а IEC.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. 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.
3. IEEE Guide to Describe the Occurrence and Mitigation of Switching Transients Induced by Transformer, Switching Device, and System Interaction. – NY: IEEE, 2010 – P. 57–142.
4. Term of Reference, Electrical Transient Interaction between Transformers and the Power System, Cigre A2/C4 committee. JWG A2/C4.39. – Paris: CIGRE, 2014. – 2 p.
5. Study Committee 12 (Transformers) – WG 12–07, Resonance Behavior of High-Voltage Transformers / A. Schei, K. Alstad, J.B. Sund, M. Rian, E. Nordrik, J. Hopperstad // Proc. 1984 CIGRÉ Large High Voltage Electric Systems Int. Conf. – Paris: CIGRE, 1984. – P. 1–8.
6. Very fast transient phenomena associated with gas insulated substations, CIGRE Working Group 33–13_1988. – Paris: CIGRE, 1988. – 20 p.
7. Electrical environment of transformers – Impact of fast transients, CIGRE Joint Working Group A2-A3-B3.21 / M. Glinkowski, W. Buesch, J. Lopez-Roldan, J. Poittevin, M. Saravolac, W. Seitlinger, N.-C. Wang // Electra. – Feb. 2005. – № 218. – P. 24–38.
8. Sybille G., Gavrilovic M.M., Bélanger J. Transformer Saturation Effects on EHV System Overvoltages // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. – March 1985. – V. PAS-104. – № 3. – P. 671–680.
9. Temporary over-voltages withstand characteristics of extra high voltage equipment, CIGRE WG 33.10 / Clerici A., Ardito A., Eitzmann M., Rioual M., Shperling B., Sybille G., Van Der Merwe C., Volker O., Wahlstrom B., Zaima E. // Electra. – August 1998. – № 179. – P. 38–49.
10. Modeling of the energization of a power transformer in a 110 kV network and its validation by on site tests / M. Rioual, P. Guuinic, D. Laval, M. Adelghani, N. Schaefer, M. Schäfer // Description of ferroresonance phenomena involved and means to avoid them: IEEE General Meeting. – Pittsburgh, 20–24 July 2008. – P. 1–8.
11. Stresses in metal-oxide surge-arresters due to temporary harmonic overvoltages / N. Nenemenlis, M. Ené, J. Bélanger, G. Sybille, L. Snider // Electra. – 1990. – № 130. – P. 79–115.
12. Ljung L. System Identification. Theory for the user. 2nd ed. – USA, New Jersey: Prentice Hall, 1999. – 672 p.
13. Van den Bosh P.P.J., Van der Klauw A.C. Modeling, Identification and Simulation of Dynamic Systems. – USA, Florida: CRC Press, 1994. – 208 p.
14. Nelles O. Nonlinear System Identification. – Germany, Berlin: Springer, 2001. – 785 p.
15. 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.
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. Бучковський, Р.В. Бучковський, А.Л. Никонец, В.П. Венгер, В.П. Венгер // Электрические станции. – 2014. – № 2. – С. 51–56.
18. Электромагнитные процессы в обмотках трансформатора при действии на него перенапряжений / Никонец А.Л., Венгер В.П., Венгер В.П. // Электрические станции. – 2014. – № 12. – С. 18–26.
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. Blakiewicz G., Janke W. Recursive convolution algorithms for time-domain simulation of electronic circuits // CMST. – 2001. – № 7 (2). – P. 91–109.

Поступила 24.11.2014 г.

UDC 621.3.013.62; 621.314.21; 621.314.222.8

MODELING OF ELECTROMAGNETIC PROCESSES IN TRANSFORMER WINDINGS UNDER THE INFLUENCE OF NETWORK OVERVOLTAGE

Leonid A. Nykonets,
National University Lviv Polytechnic, 12, St. Bandery street, Lviv city, 9013, Ukraine. E-mail: nykonets@gmail.com

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

The relevance of the study. *The phenomenon of internal resonance was not taken into consideration by any executive directive in the World when 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 study *is to state the basics of modeling, which guarantee the adequacy of simulating electromagnetic processes in transformer windings, under the influence of network overvoltage.*
The methods used in the study: *frequency methods of natural experiment and electrical circuit analysis.*
The results. *The main requirements to the models are stated: 1. A design model has to include elements, which simulate magnetic core, insulation, windings, windings' parts and their interaction with the main magnetic flux. 2. A design model has to reflect electromagnetic processes in a transformer, influenced by voltages of free form and frequency. 3. As the components of the common magnetic flux (magnetic flux inside a magnetic core and magnetic flux outside a magnetic core) influence the parameters of electromagnetic processes in a transformer in a different way, these components have to be modelled separately.*
Conclusions. *Voltage distribution along a winding and between windings is nonlinear during resonance between a transformer with linear parameters and capacitance of the network (including), where the transformer transfers energy. The task of simulation is to define overvoltage ration on the most dangerous section of a winding. The influence of magnetic flux results in developing of resonance processes of a frequency depended on parameters of windings and their parts, in disabled windings. This issue should be taken into account during modeling by creating corresponding mutual inductance connections on the magnetic flux return path, outside a magnetic core. The authors developed the method of simulating mutual inductance connections between windings and their parts. The method takes into account the violation of reciprocity principle of mutual inductance in real transformers. The authors developed the method of accounting magnetic core nonlinearity, when a transformer is influenced by network overvoltage, and the method of experimental definition of components of complex impedance of windings and their parts for a given mode of operation, and the method of realization of frequency characteristics of complex impedance components. Standard software packages, which implements the developed models, including the ones, which take into account the geometry of a transformer, are not adapted for implementing the approaches, given here. The problem of increasing transformer reliability in cases of resonance occurrence is not the problem of CIGRE, but IEC.*

Key words:
Transformer, resonance overvoltage, electromagnetic processes, longitudinal insulation, frequency research method, model.

REFERENCES

1. *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.
2. *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.
3. *IEEE Guide to Describe the Occurrence and Mitigation of Switching Transients Induced by Transformer, Switching Device, and System Interaction*. NY, IEEE, 2010. pp. 57–142.
4. *Term of Reference, Electrical Transient Interaction between Transformers and the Power System, Cigre A2/C4 committee. JWG A2/C4.39*. Paris, CIGRE, 2014. 2 p.
5. Schei A., Alstad K., Sund J.B., Rian M., Nordrik E., Hopperstad J. Study Committee 12 (Transformers) – WG 12–07, Resonance Behavior of High-Voltage Transformers. *Proc. 1984 CIGRÉ Large High Voltage Electric Systems Int. Conf*. Paris, CIGRE, 1984. pp. 1–8.
6. *Very fast transient phenomena associated with gas insulated substations, CIGRE Working Group 33–13_1988*. Paris, CIGRE, 1988. 20 p.
7. Glinkowski M., Buesch W., Lopez-Roldan J., Poittevin J., Saravolac M., Seitlinger W., Wang N.-C. Electrical environment of transformers – Impact of fast transients, CIGRE Joint Working Group A2-A3-B3.21. Electra, Feb. 2005, no. 218, pp. 24–38.
8. Sybille G., Gavrilovic M.M., Bélanger J. Transformer Saturation Effects on EHV System Overvoltages. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, March 1985, vol. PAS-104, no. 3, pp. 671–680.
9. Clerici A., Ardito A., Eitzmann M., Rioual M., Shperling B., Sybille G., Van Der Merwe C., Volker O., Wahlstrom B., Zaima E. Temporary over-voltages withstand characteristics of extra high voltage equipment, CIGRE WG 33.10. Electra, August 1998, no. 179, pp. 38–49.
10. Rioual M., Guuinic P., Laval D., Adelghani M., Schaefer N., Schäfer M. Modeling of the energization of a power transformer in a 110 kV network and its validation by on site tests. *Description of ferroresonance phenomena involved and means to avoid them: IEEE General Meeting*. Pittsburgh, 20–24 July 2008. pp. 1–8.
11. Nenemenlis N., Ené M., Bélanger J., Sybille G., Snider L. Stresses in metal-oxide surge-arresters due to temporary harmonic overvoltages. *Electra*, 1990, no. 130, pp. 79–115.

12. Ljung L. *System Identification. Theory for the user*. 2nd ed. USA, New Jersey, Prentice Hall, 1999. 672 p.
13. Van den Bosh P.P.J., Van der Klauw A.C. *Modeling, Identification and Simulation of Dynamic Systems*. USA, Florida, CRC Press, 1994. 208 p.
14. Nelles O. Nonlinear System Identification. Germany, Berlin, Springer, 2001. 785 p.
15. 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]. Ed. by Nykonets L. Lviv, Ukrainian technologies Publ., 2012. 167 p.
16. Sabat M., Nykonets A., Venger V., Venger V. Elektromagnitnye protsessy i usloviya vozniknoveniya 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]. *Electricheskie 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]. *Electricheskie stantsii*, 2014, no. 12, pp. 18–26.
19. Venger V., Venger V., Nykonets A. 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. Blakiewicz G., Janke W. Recursive convolution algorithms for time-domain simulation of electronic circuits. *CMST*, 2001, no. 7 (2), pp. 91–109.

Received: 24 November 2014.