

ЗАВИСИМОСТЬ ХАРАКТЕРА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В АКТИВНОЙ ЧАСТИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ОТ ПАРАМЕТРОВ ТЕСТОВЫХ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ИМПУЛЬСОВ

К.В. Делич, П.С. Понимаскин, А.А. Грибанов

В статье описаны и проанализированы результаты экспериментальных исследований изменения тестирующего сигнала прямоугольной формы при прохождении через активную часть трехфазного силового трансформатора. Приведены схемы диагностики двухобмоточных трансформаторов стержневого типа. Представлены основные закономерности исследуемых процессов и дано объяснение изменениям диагностического сигнала в зависимости от схемы диагностики и параметров тестирующего импульса.

Ключевые слова: силовой трансформатор, диагностика, волновые затухающие колебания.

Силовые трансформаторы являются основным устройством, преобразующим переменный ток одного напряжения в переменный ток другого напряжения. В настоящее время парк трансформаторов в нашей стране существенно изношен. Наибольшую его часть составляют трансформаторы со сроком службы более 20 лет. Поэтому актуальной является проблема обеспечения закреплённого ГОСТ Р 52719-2007 «Силовые трансформаторы. Общие технические условия» уровня надёжности. Он описывается двумя параметрами:

- установленная наработка на отказ должна составлять не менее 25000 часов;
- полный срок службы – не менее 30 лет.

Решить данную проблему можно различными способами. В современных условиях сложилась система, которая предполагает выполнение технических мероприятий в соответствии с утверждённым планом. Однако эта система имеет ряд недостатков. Наиболее существенным из них является необоснованность объёма и сроков проведения мероприятий по обслуживанию и ремонту. Альтернативой является система обслуживания трансформаторов по их фактическому состоянию [1].

Для реализации такого вида обслуживания требуется наличие достоверной информации о фактическом состоянии трансформатора. Её можно получить при использовании различных методов диагностики. В настоящее время нормативными документами предусмотрена целая программа измерений и испытаний различных узлов силового трансформатора. Однако измерение большей части диагностических параметров требует вывода трансформатора из работы. При этом

измерение одного параметра позволяет получить информацию о состоянии только определённой части или конкретного узла трансформатора. Поэтому актуальной является разработка методов диагностики, которые бы позволили получать информацию о состоянии большей части узлов трансформатора в комплексе. Кроме этого в настоящее время активно развивается направление непрерывного контроля состояния трансформаторов [2,3]. Наиболее эффективной такая система станет при использовании достоверных методов диагностики. Одним из таких методов является метод волновых затухающих колебаний. Этот метод позволяет выявлять не только дефекты электрической природы, но и механической и электромагнитной. Суть его состоит в том, что на один вывод обмотки подаётся тестовый сигнал прямоугольной формы, а с другого вывода фиксируется диагностический сигнал [4, 5]. Следует учитывать, что снимать диагностический сигнал можно как с обмотки другой фазы того же напряжения (рисунок 1,а), так и с обмотки любой фазы другого напряжения (рисунок 1,б). Первый случай будем называть диагностикой обмоток одного напряжения, а второй – продольной диагностикой трансформатора.

Математическое моделирование процессов, протекающих при тестировании обмотки трансформатора импульсами прямоугольной формы для тестирования обмоток одного напряжения, выполнено в работе [5]. Моделирование в этой работе выполнялось для условно-идеального состояния изоляции трансформатора. Таким состоянием обладает вновь изготовленный трансформатор без производственных дефектов.

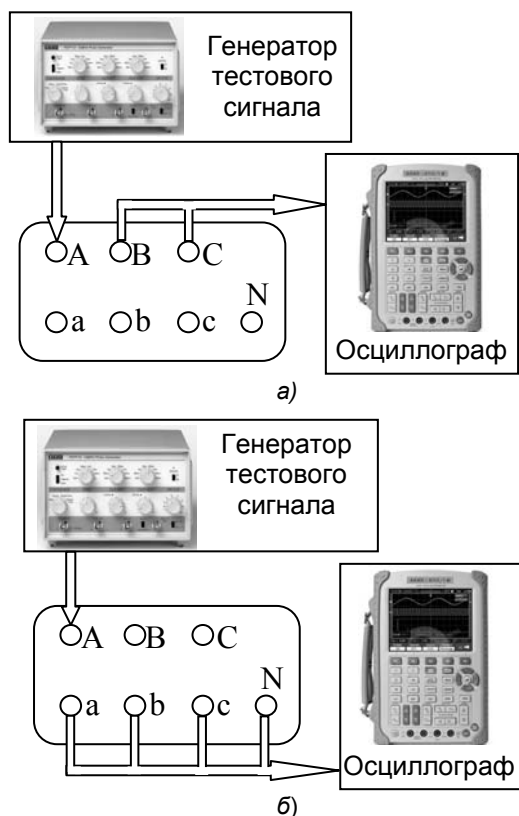


Рисунок 1 – Схемы диагностики обмоток одного напряжения (а) и продольной диагностики (б) силового трансформатора

Математическая модель отражает основные закономерности протекающих процессов, однако оценить её адекватность можно только после сопоставления результатов эксперимента с характеристиками, полученными с использованием модели.

Для установления закономерностей протекания процессов при диагностике был взят новый трёхфазный двухобмоточный силовой трансформатор стержневого типа со схемой соединения «звезда с нулём – звезда». Тестовые прямоугольные импульсы генерировались с помощью разработанного генератора прямоугольных импульсов «Пульсер-1», имеющего функцию регулирования частоты и амплитуды импульса. Для регистрации сигнала использовался электронный осциллограф Bordo 221. Для защиты осциллографа от повышенного напряжения использовался выносной делитель напряжения (пробник) с коэффициентами 1:10 и 1:100 в зависимости от амплитуды импульсов.

На первом этапе эксперимента исследовалась зависимость переходного процесса в обмотках при изменении параметров тестового сигнала.

Результаты экспериментов по изменению частоты тестирующего сигнала при диагностике обмоток одного напряжения приведены на рисунке 2.

При низкой частоте сигнала (рисунок 2,а) основную продолжительность импульса занимает установившееся значение, информативность которого равна нулю. По мере роста частоты доля установившегося значения в общем объёме импульса сокращается. При частоте 8000 Гц (рисунок 2,е) переходный процесс не успевает завершиться. Поэтому можно сделать вывод о том, что максимальной информативности можно добиться при частотах от 6000 до 8000 Гц.

Анализ переходного процесса, протекающего при различных частотах тестового сигнала, показал независимость его формы от частоты. Форма переходного процесса для исследуемого трансформатора имеет следующую конфигурацию:

- в диапазоне от 0 до 7 мкс переходный процесс имеет вид колебаний, по форме близких к гармоническим;
- в диапазоне от 7 мкс до 50 мкс идёт рост полуволны до максимального значения;
- в диапазоне от 50 мкс до 110 мкс идёт спад до установившегося значения.

Переходный процесс идёт одинаково по характеру изменения во времени не зависимо от частоты тестирующего сигнала. Таким образом, экспериментально доказана независимость формы переходного процесса от частоты сигнала.

Как известно трёхфазный силовой трансформатор стержневой конструкции имеет следующее размещение обмоток: на наружных стержнях расположены обмотки фаз А и С, а на среднем стержне – фазы В. Поэтому для достоверной диагностики необходимо решить вопрос о влиянии размещения обмоток на форму переходного процесса. Для этого был проведён эксперимент, связанный с изменением направления тестирования обмоток. На рисунке 3 представлены формы кривых переходных процессов при частоте тестирующего сигнала 6000 Гц. Сравнивая их можно заметить, что при диагностике в направлении А–В и В–А формы кривых отличаются друг от друга. Аналогичная ситуация с формой сигнала при тестировании фаз А–С и С–А. Однако при тестировании фаз В–С и С–В формы кривой одинаковы. Это свидетельствует о том, что имеется несимметрия или дефект фазы А.

ЗАВИСИМОСТЬ ХАРАКТЕРА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В АКТИВНОЙ ЧАСТИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ОТ ПАРАМЕТРОВ ТЕСТОВЫХ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ИМПУЛЬСОВ

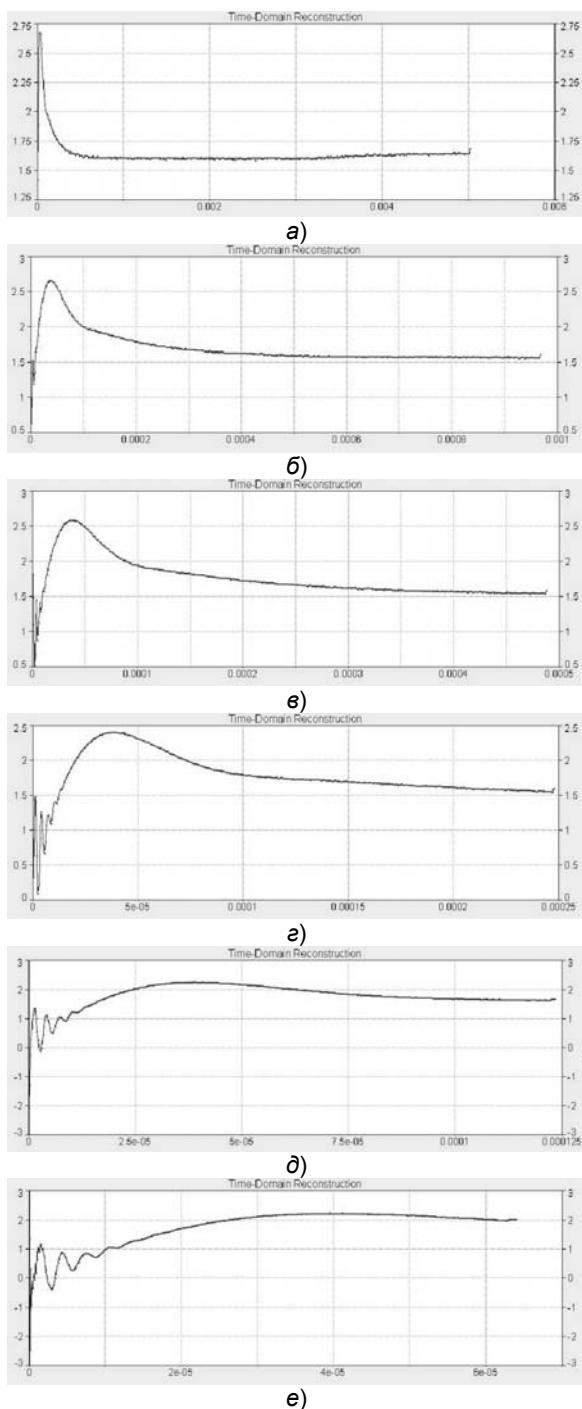


Рисунок 2 – Форма кривой переходного процесса при диагностике обмоток одного напряжения и частотах сигнала: а – 100 Гц; б – 500 Гц; в – 1000 Гц; г – 2000 Гц; д – 4000 Гц; е – 8000 Гц

Отметим, что тестирование в направлении С–А дало форму кривой с наибольшими отличиями от остальных. Это можно объяснить наибольшим удалением обмотки фазы А от фазы С. Обмотка фазы В имеет по сравнению с предыдущим более короткую магнитную цепь.

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК №2/2 2011

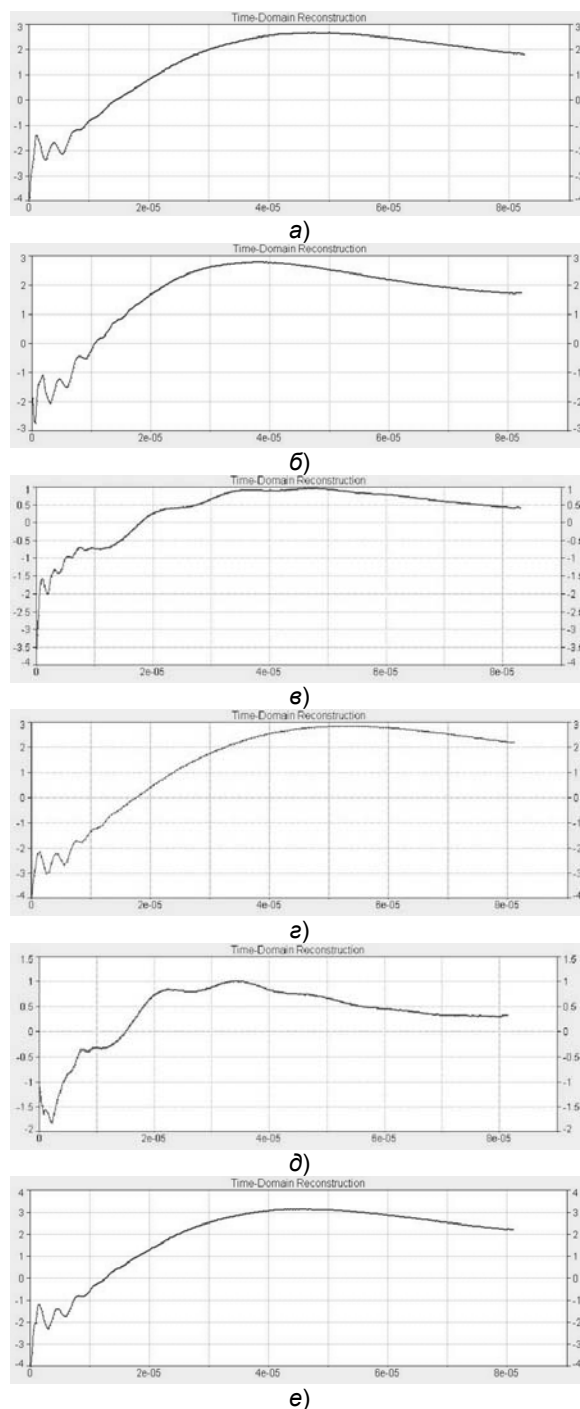


Рисунок 3 – Формы кривых переходных процессов при частоте тестирующих импульсов 6000 Гц между вводами фаз: а – А–В; б – А–С; в – В–А; г – В–С; д – С–А; е) С–В

Аналогичные измерения были проведены для обмоток низкого напряжения. Характер протекания переходного процесса, так же как и для обмотки высокого напряжения, не зависит от частоты импульсов. Процесс занимает примерно столько же времени. Одна-

ко все кривые переходных процессов оказались одинаковы, что свидетельствует об отсутствии дефектов в обмотке низшего напряжения. Осциллограмма диагностического сигнала для обмотки низкого напряжения показана на рисунке 4.

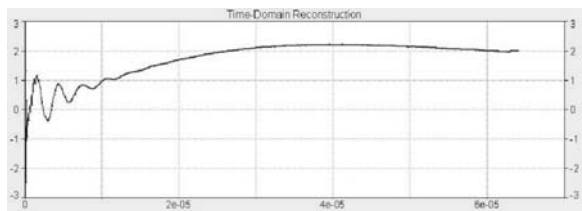
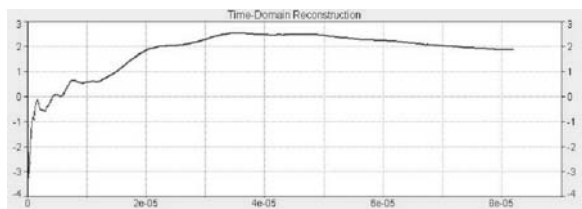
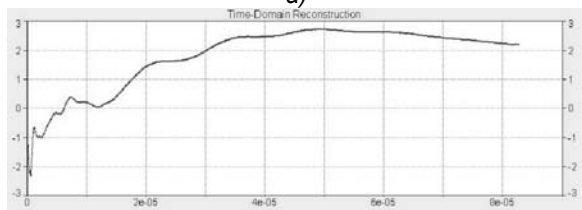


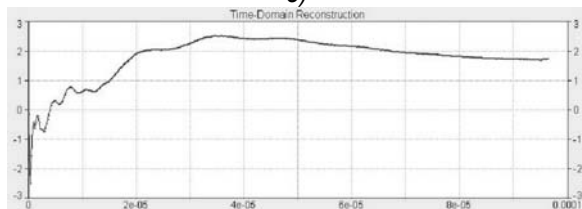
Рисунок 4 – Форма кривой переходного процесса при диагностике фаз низкого напряжения при частоте 8000 Гц



а)



б)

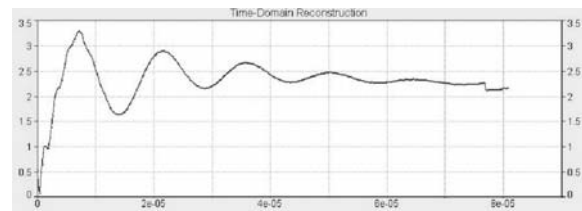


в)

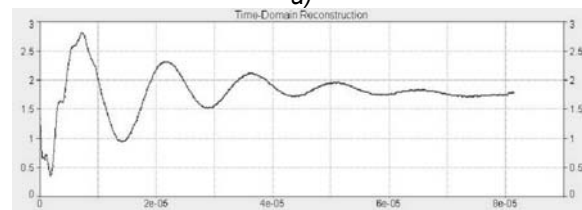
Рисунок 5 – Формы кривых переходного процесса при диагностике вывод фазы – нулевой вывод для фаз А (а), В (б) и С (в) при частоте импульсов 6000 Гц

Поскольку обмотка высшего напряжения имеет нулевой вывод, то интерес представляет изменение сигналов при прохождении только по одной фазе обмотки. На рисунке 5 приведены осциллограммы тестирования обмоток высшего напряжения, снятые с нулевого вывода. Анализируя их можно прийти к заключению о том, что они одинаковы. Незначительно отличается от двух других осциллограмма процесса для фазы С. Одинаковость осциллограмм можно объяснить возможным наличием процессов намагничивания и нали-

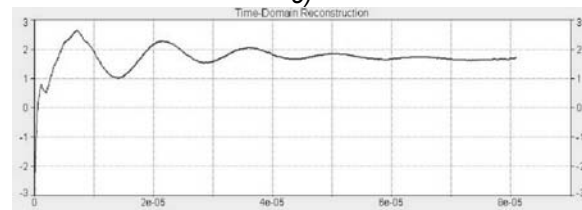
чия электрической связи между обмотками при таком направлении диагностики. Импульсы напряжения наводят в обмотках магнитные поля, которые направлены согласно друг с другом. Их влияние и выравнивает осциллограммы.



а)



б)



в)

Рисунок 6 – Формы кривых переходного процесса при диагностике нулевой вывод – вывод фазы для фаз А (а), В (б) и С (в) при частоте импульсов 6000 Гц

На рисунке 6 приведены осциллограммы переходного процесса при тестировании обмоток подачи импульсов на нулевой вывод и фиксации диагностического сигнала с выводов фаз. В отличие от предыдущего случая осциллограммы, особенно на начальном участке, имеют отличия друг от друга. В дальнейшем процесс развивается как классический волновой затухающий в электромагнитном контуре. Объяснение различию между осциллограммами, приведёнными на рисунке 5 и 6, очень простое: при подаче тестового сигнала на нулевой вывод в обмотках протекает одинаковый процесс, но электрически обмотки между собой не связаны, а также магнитные потоки направлены встречно и друг с другом практически не взаимодействуют, так как во времени не сдвинуты. Таким образом, при использовании диагностики одной фазы необходимо учитывать для адекватного анализа результатов измерений направление протекания диагностического сигнала.

ЗАВИСИМОСТЬ ХАРАКТЕРА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В АКТИВНОЙ ЧАСТИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ОТ ПАРАМЕТРОВ ТЕСТОВЫХ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Характер переходного процесса в случае продольной диагностики обмоток одноимённых фаз при подаче тестового сигнала на обмотку высокого напряжения и фиксации диагностического сигнала на обмотке низкого напряжения сходен с характером процесса при диагностике обмоток одного напряжения, но амплитуда полуволны по окончании волновых затухающих колебаний гораздо меньше, и полуволна явно не выражена. Между собой переходные процессы, протекающие в одноимённых фазах, в общем виде сильно похожи. Различия не существенны. Поэтому можно сделать вывод, что при таком направлении диагностики решающее значение имеет состояние обмотки низкого напряжения, то есть той обмотки, с которой снимается диагностический сигнал. Полученная форма кривой при описанном направлении прохождения сигнала приведена на рисунке 7.

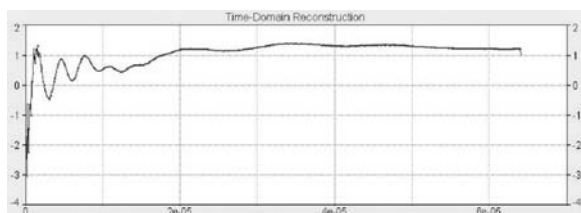


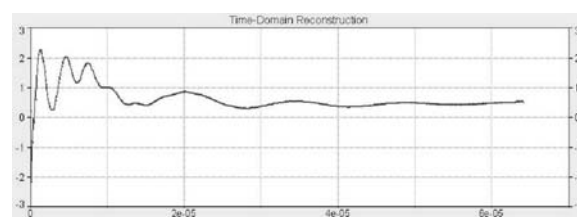
Рисунок 7 – Форма кривой переходного процесса при продольной диагностике одноимённых фаз с подачей тестового сигнала на обмотку высшего напряжения при частоте тестового сигнала 8000 Гц

Существенным отличием продольной диагностики от диагностики обмоток одного напряжения с точки зрения преобразования сигнала состоит в том, что вместо чередующегося сигнала вида положительного меандра (ступень положительного потенциала сменяется ступенью нулевого потенциала) на обмотке другого напряжения появляется знакопеременный меандр (ступень положительного потенциала сменяется ступенью отрицательного потенциала). Амплитуда сигнала не зависит от коэффициента трансформации. За счёт того, что в выходном сигнале имеются и положительная, и отрицательная полуволны, амплитуда получается вдвое меньшей по сравнению с результатами расчётов для положительного меандра.

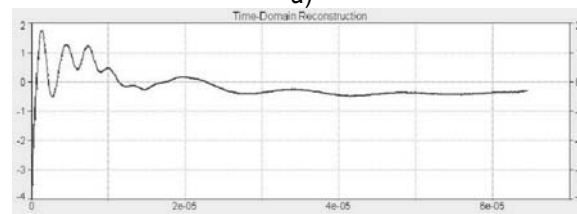
На рисунке 8 приведены формы кривых переходного процесса, протекающего в одноимённых фазах при продольной диагностике трансформатора подачей тестирующего импульса на обмотку низшего напряжения. Анализируя осциллограммы можно заметить, что характер процесса во всех фазах одинаков.

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК №2/2 2011

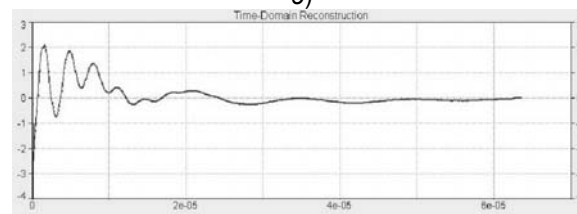
При этом он существенно отличается от всех других переходных процессов: волновые затухающие колебания, как и в других случаях, наиболее интенсивно протекают в начале переходного процесса, но в дальнейшем достигается установившийся режим со значением амплитуды напряжения, меньшим по сравнению с тем, которое фиксировалось во время колебаний. Во всех остальных случаях наблюдалась характерная полуволна, превосходящая волновой затухающий процесс, и напряжение устанавливалось на уровне, превышающем значения напряжения во время указанного процесса.



а)



б)



в)

Рисунок 8 – Формы кривых переходного процесса при продольной диагностике одноимённых фаз с подачей тестового сигнала на обмотку низшего напряжения при частоте тестового сигнала 8000 Гц:
а – А; б – В; в – С

На рисунке 9 представлены формы кривых переходного процесса при подаче тестового импульса на фазу обмотки высшего напряжения и снятии диагностического сигнала с другой фазы обмотки низкого напряжения. Анализируя формы кривых можно заметить, что при подаче тестового сигнала на фазы А и С характер изменения сигнала сходен, а при подаче сигнала на фазу В – отличается. В последнем случае период колебаний примерно в десять раз больше, чем у диагностического сигнала фаз А и С. Это объясняется тем, что обмотка фазы В находится на сред-

нем стержне магнитопровода. Поэтому процесс намагничивания протекает несколько иначе. Магнитная цепь имеет равномерный характер, так как длина средней линии магнитопровода при намагничивании среднего стержня будет одинакова для обеих цепей, замыкающихся по крайним стержням. В случае намагничивания крайних стержней магнитные цепи по своей длине получаются разными. Однако характер диагностических сигналов оказался одинаковым. Это можно объяснить взаимным магнитным влиянием обмоток друг на друга.

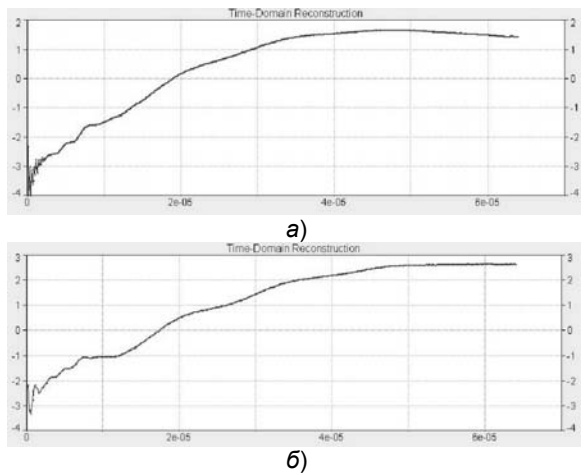


Рисунок 9 – Формы кривых переходного процесса при продольной диагностике разноимённых фаз с подачи тестового сигнала на обмотку высшего напряжения при частоте тестового сигнала 8000 Гц:

а – А-В, А-С, С-А, С-В; б – В-А, В-С

При подаче тестового сигнала на выводы обмотки высшего напряжения и фиксации диагностического сигнала на выводах других фаз обмотки низшего напряжения получается практически такая же форма диагностического сигнала, как и в предыдущем случае (рисунок 10). Как и в предыдущем случае, большое значение играет взаимное расположение обмоток на магнитопроводе. Анализ осциллограмм позволил сгруппировать их по сходному внешнему виду. Оказалось, что одинаковый характер переходного процесса имеет место при подаче тестирующего импульса на фазы А и С и фиксации диагностического сигнала на фазе В, которые в отношении магнитной связи находятся в равных условиях (рисунок 10, а). Схожие кривые переходного процесса получены при подаче импульсов на фазу В и измерении сигнала, снимаемого с фаз А и В (рисунок 10, б). Аналогичная ситуация сложилась при тестировании фазы С и фиксации диагностического сигнала с фазы А

и наоборот (рисунок 10, в). Из этого можно сделать вывод о том, что характер переходного процесса при продольной диагностике трансформаторов зависит от взаимного расположения на магнитопроводе обмоток, на которые подаётся прямоугольный импульс и с которых снимается полезный диагностический сигнал.

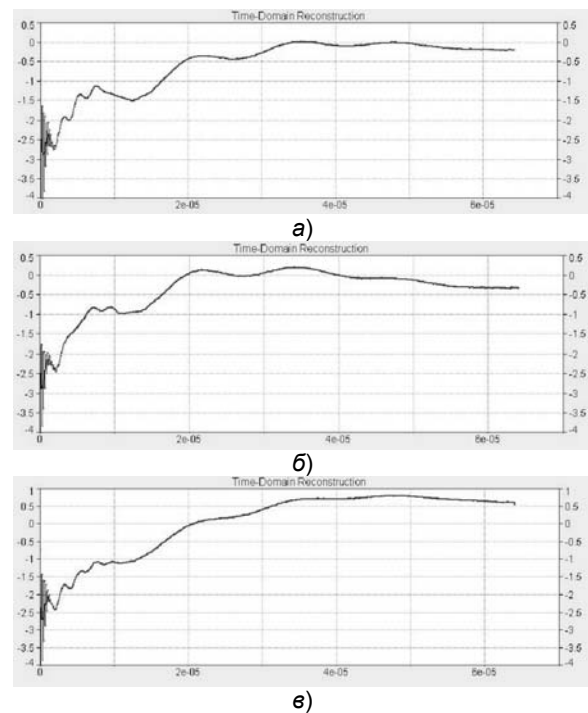


Рисунок 10 – Формы кривых переходного процесса при продольной диагностике разноимённых фаз с подачи тестового сигнала на обмотку низшего напряжения при частоте тестового сигнала 8000 Гц: а – а-В, с-В; б – а-С, с-А; в – б-А, б-С

Отдельный интерес представляет исследование характера переходного процесса на нулевом выводе обмотки высшего напряжения при подаче тестового сигнала на выводы обмотки низшего напряжения. Результаты измерений показали, что независимо от того, на какую фазу подаётся сигнал, на нулевом выводе регистрируется диагностический сигнал одной и той же формы (рисунок 11). Это свидетельствует о том, что сигнал на нулевом выводе является результатом суммирования процессов, протекающих в отдельных обмотках.

ЗАВИСИМОСТЬ ХАРАКТЕРА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В АКТИВНОЙ ЧАСТИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ОТ ПАРАМЕТРОВ ТЕСТОВЫХ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ИМПУЛЬСОВ

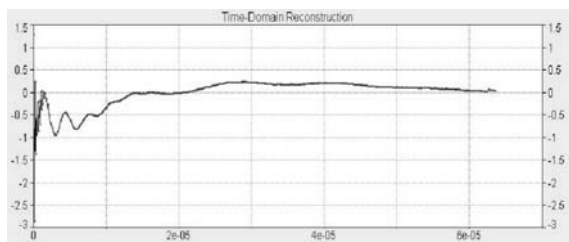


Рисунок 11 – Формы кривых переходного процесса на нулевом выводе при продольной диагностике с подачей тестового сигнала на обмотку низшего напряжения при частоте тестового сигнала 8000 Гц

Как можно видеть из приведённых выше описаний результатов экспериментов силовой трансформатор, несмотря на сравнительную простоту своего устройства, является неоднородной системой, в которой при тестировании протекают сложные электромагнитные процессы. Эта сложность порождена сравнительно большим количеством конструктивных элементов, участвующих в создании и изменении параметров электромагнитных колебаний. Как уже было показано выше, характер колебательных процессов иногда очень существенно отличается в зависимости от того, каким образом на активную часть трансформатора попадает тестирующий импульс, и какой путь преобразования претерпевает сигнал, проходя по ней. Разнообразие форм переходных процессов свидетельствует о наличии большого числа различных параметров, с которыми волновые затухающие колебания связаны законами электродинамики. Поэтому рассмотренные процессы представляют особый интерес для дальнейшего исследования и практического применения в автоматизированных системах диагностики различного трансформаторно-реакторного оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Львов, М.Ю. О развитии системы нормативно-технической документации для оценки технического состояния силовых трансформаторов [Текст] / М.Ю. Львов // Электрические станции. – № 3. – 2009. – С.53-55.
2. Лозовский, В. Математическая модель и методология автоматизированного мониторинга технического состояния силовых распределительных трансформаторов [Текст] / В. Лозовский, Р. Карамутдинов, Ю. Савинцев // Энерго-инфо. – № 9. – 2010. – С.78-80.
3. Keitoue, S. Система мониторинга трансформатора – неотъемлемая часть «интеллектуальной электросети» [Текст] / S. Keitoue // Энерго-инфо. – № 8. – 2010. – С.76-80.
4. Грибанов, А.А. Диагностирование силовых трансформаторов на основе анализа параметров переходного процесса в обмотках фаз одного напряжения [Текст] / А.А. Грибанов // Вестник Томского государственного университета: Общественный периодический журнал. Бюллетень оперативной научной информации. Социальные, информационные и энергетические проблемы региона. – №82. – Томск: Томский государственный университет, 2006. – С. 15 – 23.
5. Грибанов, А.А. Математическое моделирование диагностического сигнала при оценке состояния силовых трансформаторов по методу низковольтных импульсов [Текст] / А.А. Грибанов, С.О. Хомутов. – Ползуновский вестник. – №2. – 2010. – С.232-238.

Делич К.В., студент, кафедра «Электроснабжение промышленных предприятий», АлтГТУ им. И.И. Ползунова;

Понимаскин П.С., студент, кафедра «Электроснабжение промышленных предприятий», АлтГТУ им. И.И. Ползунова;

Грибанов А.А., к.т.н., доцент, кафедра «Электроснабжение промышленных предприятий», АлтГТУ им. И.И. Ползунова, тел.: 8(3852) 29-07-76, E-mail: diread@mail.ru