

СПЕКТРАЛЬНЫЙ СОСТАВ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА ПРИ ТЕСТИРОВАНИИ ОБМОТОК СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПРЯМОУГОЛЬНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ НАПРЯЖЕНИЯ

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

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова
(г. Барнаул)

В электрических системах для преобразования одного уровня переменного напряжения в другой уровень применяют трёхфазные силовые трансформаторы. Вследствие затяжного экономического кризиса, имевшего место в нашей стране в 1990-х и начале 2000-х годов, длительное время парк силовых трансформаторов практически не обновлялся из-за отсутствия финансовых средств. Следствием этого является современная ситуация, выражающаяся в сильном износе основных фондов электрических сетей. Срок службы большинства трансформаторов приближается к полному, который в соответствии с ГОСТ Р 52719-2007 «Силовые трансформаторы. Общие технические условия» должен составлять не менее 30 лет. Замена изношенных трансформаторов на новые в короткие сроки не представляется возможной по экономическим причинам. Поэтому актуальной в настоящее время является проблема обеспечения эксплуатационной надёжности силовых трансформаторов путём использования эффективной системы технических мероприятий.

Широкое распространение на практике для обеспечения надёжности трансформаторов получила система планово-предупредительных ремонтов, которая предусматривает выполнение регламентированных мероприятий с указанной периодичностью. В настоящее время эта система признаётся неэффективной по экономическим параметрам, так как частое выполнение технических мероприятий приводит к неоправданным затратам ресурсов. Альтернативной системой является система технического обслуживания трансформаторов по фактическому состоянию [1]. Суть этой системы состоит в том, что мероприятия по восстановлению свойств узлов трансформатора следует выполнять только в случае достижения им определённого минимального уровня надёжности. Для определения такого состояния необходимо использовать методы диагностики, позволяющие получить достоверную информацию о состоянии трансформатора.

В настоящее время для диагностики трансформаторов используется сравнительно большое количество методов, регламентированных действующими нормативными документами. Большинство используемых методов диагностики составляют методы тестовой диагностики, то есть требующие для выполнения измерений вывода трансформатора из работы, что не всегда приемлемо. Методы функциональной диагностики (например, тепловизионный) являются дорогостоящими. Поэтому актуальной в настоящее время является разработка достоверных методов функциональной диагностики, имеющих сравнительно низкую стоимость и обладающих возможностью автоматизации.

Одним из таких методов может стать метод волновых затухающих колебаний, который 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 [2, 3]. Следует учитывать, что фиксировать 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.

Результаты теоретических исследований процессов, протекающих при тестировании обмотки трансформатора импульсами прямоугольной формы для тестирования обмоток одного напряжения, приведены в работе [3]. Моделирование в этой работе выполнялось для условно-идеального состояния изоляции трансформатора. Таким состоянием обладает электроизоляционная система вновь изготовленного трансформатора без производственных дефектов.

Математическая модель, имеющая высокую точность при описании процессов, может лежать в основе работы системы автоматизированного прогнозирования состояния

СПЕКТРАЛЬНЫЙ СОСТАВ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА ПРИ ТЕСТИРОВАНИИ ОБМОТОВ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПРЯМОУГОЛЬНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ НАПРЯЖЕНИЯ

трансформаторов. Для обеспечения высокой эффективности функционирования такой системы необходима информационная основа в виде основных параметров диагностического сигнала. Поскольку технология сравнения изображений кривых переходного процесса с идеальной формой отличается сильным воздействием субъективного фактора, то требуется создать более совершенную методику диагностики, отличающуюся более высокой точностью и объективностью. Решением проблемы может стать использование спектрального анализа кривой переходного процесса.

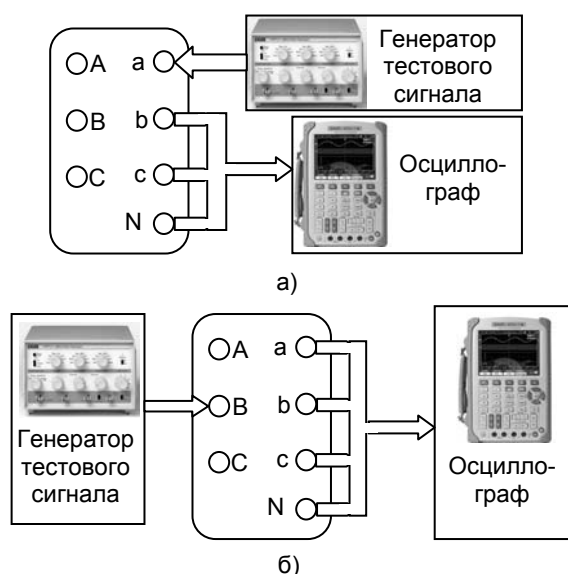


Рисунок 1 – Схемы диагностики обмоток одного напряжения (а) и продольной диагностики (б) силового трансформатора

Характерный спектральный состав трехфазного силового трансформатора было решено получить путём проведения комплекса экспериментальных исследований. Объектом исследования были процессы, протекающие в новом трёхфазном двухобмоточном силовом трансформаторе 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 экспериментов исследовалась зависимость формы кривой пере-

ходного процесса от параметров тестового сигнала. В результате установлено, что форма кривой переходного процесса не зависит от частоты тестирующего импульса. Исследование зависимости формы кривой переходного процесса от амплитуды тестирующего импульса показало, что форма диагностирующего сигнала не меняется. Количественные значения напряжения меняются пропорционально амплитуде тестового сигнала.

Вторым этапом исследований стало обоснование наиболее рациональной частоты тестового сигнала, при котором информативность диагностического сигнала максимальна. При сравнительно низкой частоте (рисунок 2, а) большую часть времени занимает установившееся значение диагностического сигнала, информативность которого равна нулю.

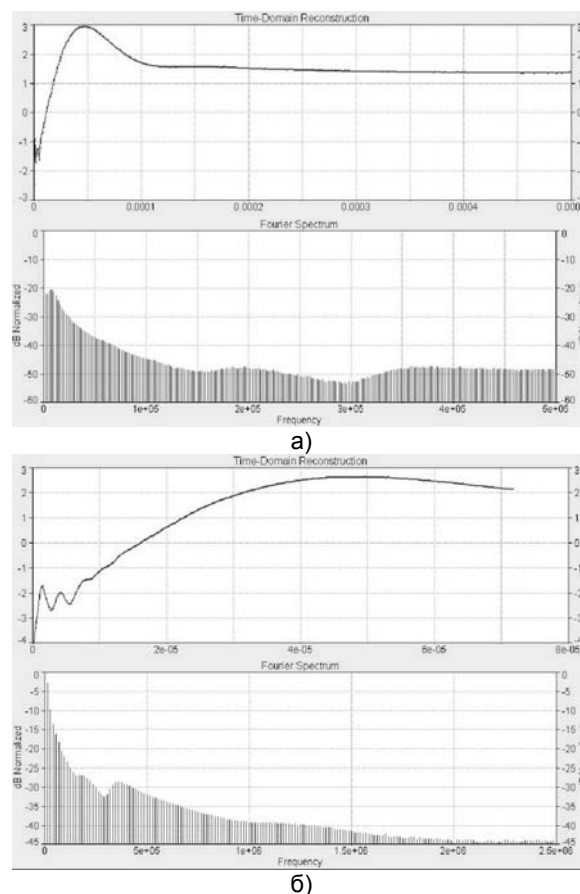


Рисунок 2 – Вид кривой переходного процесса и его осциллограмма при частоте тестирующего сигнала 1000 Гц (а) и 7000 Гц (б)

При увеличении частоты тестирующих импульсов увеличивается ширина полосы спектра на спектрограмме диагностического сигнала. При этом имеющиеся на спектрограмме максимумы и минимумы наблюдают-

ся при тех же частотах, что и на спектрограмме для меньшей частоты тестирующих импульсов, но становятся ярко выраженными из-за визуального «сжатия». Полоса спектра от 0 до 500 кГц, которая занимает всю ширину спектрограммы при частоте тестирующих импульсов 1000 Гц, в спектрограмме при частоте импульсов 7000 Гц занимает 1/5 часть. Анализируя спектрограмму при частоте импульсов 7000 Гц можно заметить, что в полосе частот от 1,5 до 2,5 МГц изменение амплитуд частот перестаёт быть плавным, и появляются отдельные узкие полосы частот, для которых амплитуда резко отличается от соседних участков либо в сторону уменьшения, либо увеличения. Именно такие узкие полосы частот и могут претендовать на роль диагностических параметров при выявлении конкретных дефектов. Поэтому был сделан вывод о том, что дальнейшие исследования целесообразно проводить при частоте тестирующих импульсов 7000 Гц.

Проведём анализ спектрограмм для диагностики обмоток одного напряжения. При такой диагностике актуальным является вопрос о зависимости результатов диагностики от направления прохождения диагностического сигнала через активную часть трансформатора. На рисунке 3 показаны спектрограммы при противоположных направлениях прохождения диагностического сигнала.

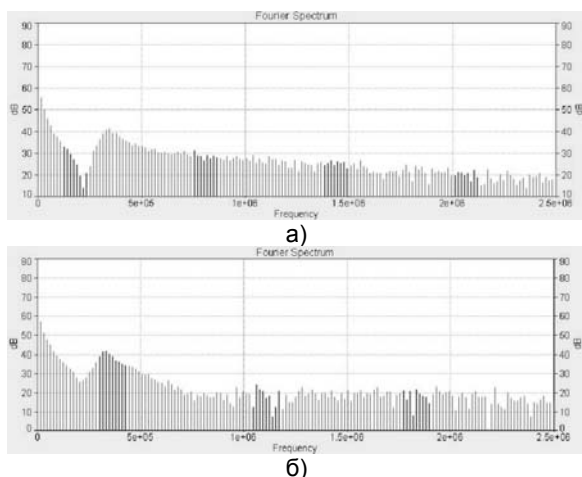


Рисунок 3 – Спектрограммы диагностического сигнала при подаче тестовых импульсов на вывод фазы А и фиксации сигнала на выводе фазы С (а) и подаче тестового сигнала на вывод фазы С и фиксации сигнала на выводе фазы А (б)

Анализ спектрограмм, представленных на рисунке 3, показывает, что амплитудный состав спектрограммы неодинаков при различных направлениях прохождения диагностического сигнала через активную часть

трансформатора. При этом форма переходного процесса в обоих направлениях существенных отличий не имеет. Это свидетельствует, во-первых, о высокой чувствительности выбранного способа анализа диагностической информации, и, во-вторых, о том, что протекающие электромагнитные процессы имеют сложный характер и зависят от большого числа факторов, влияние которых ещё предстоит установить. Выполненные измерения показали, что несовпадение спектрограмм имеет место, как при диагностике обмоток высшего напряжения, так и при диагностике обмоток низшего напряжения. Это несовпадение объясняется тем, что параметры диагностического сигнала определяются главным образом состоянием обмотки фазы, на которую подаются тестовые импульсы, что проиллюстрировано на рисунке 4. Обмотка фазы В располагается на среднем стержне магнитопровода. Поэтому если состояние обмоток одинаковое теоретически на выводах фаз А и С должен фиксироваться одинаковый диагностический сигнал. Поскольку спектрограммы, приведённые на рисунке 4, отличаются незначительно, то можно прийти к выводу о том, что рассматриваемая гипотеза справедлива.

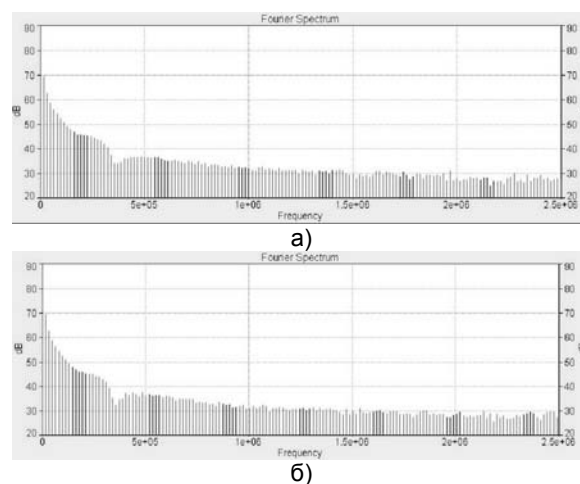


Рисунок 4 – Спектрограммы диагностического сигнала при подаче тестовых импульсов на вывод фазы В и фиксации сигнала на выводах фазы А (а) и С (б)

Если диагностический сигнал подаётся на выводы фаз А или С, обмотки которых размещены на крайних стержнях магнитопровода, то могут наблюдаться отличия в спектрограммах, связанные с прохождением сигнала не только по электрической цепи, но и по магнитной цепи с разной длиной. Анализ спектрограмм, приведённых на рисунке 5, позволяет сделать вывод о том, что влияние

СПЕКТРАЛЬНЫЙ СОСТАВ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА ПРИ ТЕСТИРОВАНИИ ОБМОТOK СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПРЯМОУГОЛЬНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ НАПРЯЖЕНИЯ

отличий параметров магнитной цепи на раз-
личие в спектрограммах не очень велико.

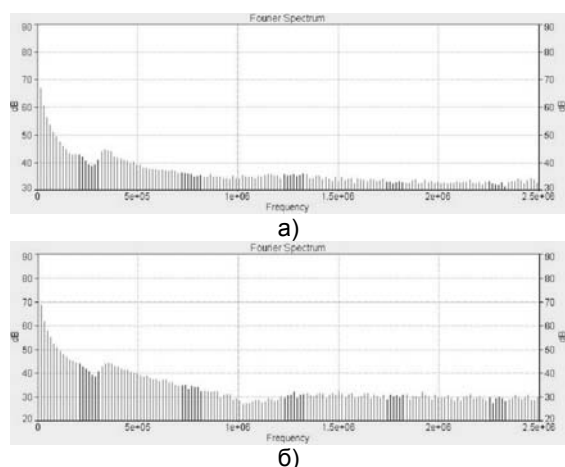


Рисунок 5 – Спектрограммы диагностического сигнала при подаче тестовых импульсов на вывод фазы С и фиксации сигнала на выводах фазы А (а) и В (б)

Подтвердить эту гипотезу может исследование, в котором участвуют только обмотки одной фазы. Для этого необходимо провести анализ диагностических сигналов, проходящих через обмотки фаз при их тестировании с использованием вывода нейтрали. Спектрограммы, приведённые на рисунке 6, характеризуют переходный процесс в обмотках фаз при его фиксации на выводе нейтрали. Анализ этих спектрограмм позволяет прийти к выводу о том, что существенных отличий при таком способе диагностики наблюдаться не должно. Имеющиеся отличия для фазы С свидетельствуют об имеющихся в этой фазе дефектах.

На рисунке 7 приведены спектрограммы, полученные при подаче диагностического сигнала на вывод нейтрали и фиксации сигнала на выводах фаз. Как видно из рисунка 7, характер спектрограммы резко отличается от приведённых на рисунке 6. Это свидетельствует о том, что прохождение импульсов в этом направлении вызывает большее влияние на процесс в магнитной цепи, так как сигнал распространяется во всех обмотках в одном направлении. В результате этого наблюдается взаимокompенсация и уменьшение в спектрограмме амплитуд низких частот с ярко выраженным пиком при частоте 70 кГц. Спектральный состав в полосе спектра от 500 кГц до 2,5 МГц имеет равномерный характер. Отличие спектрограммы для фазы С (рисунок 7, в) от двух других спектрограмм объясняется наличием в ней дефектов.

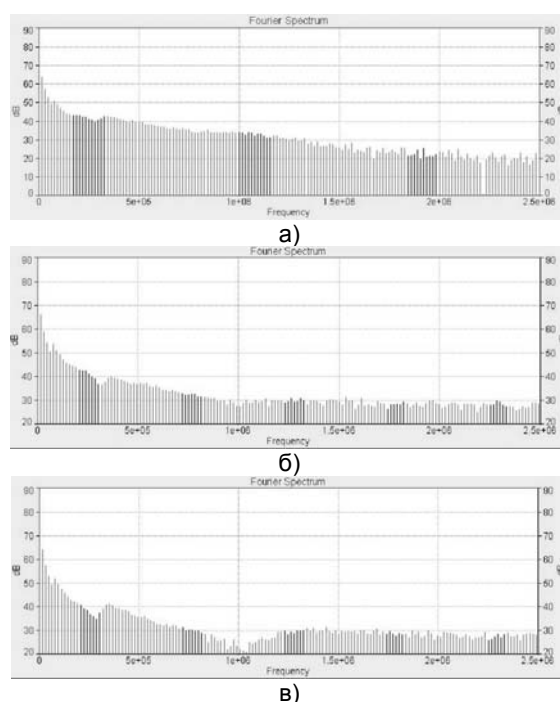


Рисунок 6 – Спектрограммы диагностического сигнала при подаче тестовых импульсов на вывод фаз А (а), В (б), С (в) и фиксации сигнала на выводе нейтрали

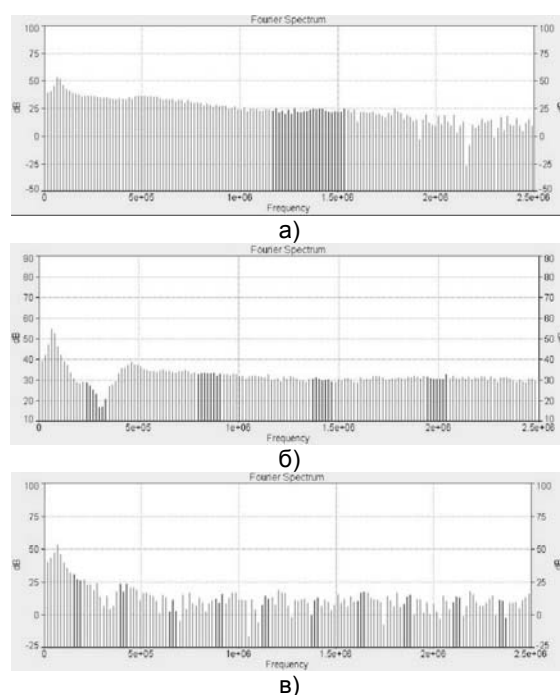


Рисунок 7 – Спектрограммы диагностического сигнала при подаче тестовых импульсов на вывод нейтрали и фиксации сигнала на выводах фаз А (а), В (б) и С (в)

Продольная диагностика трансформатора представляет особый интерес для практического использования. Экспериментальные исследования позволили установить следующий факт: при подаче серии однополяр-

ных импульсов на вывод обмотки одного напряжения трансформатора с вывода обмотки другого напряжения снимается биполярный сигнал, амплитуда напряжения которого в два раза меньше амплитуды тестирующего сигнала (рисунок 8).

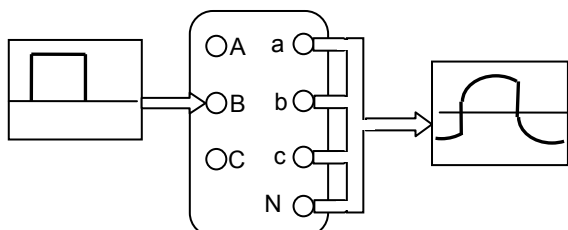
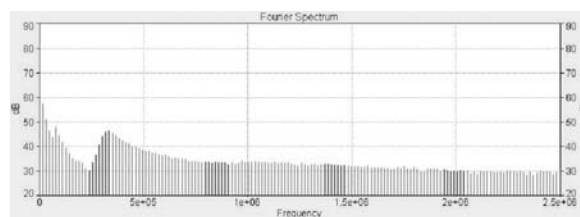
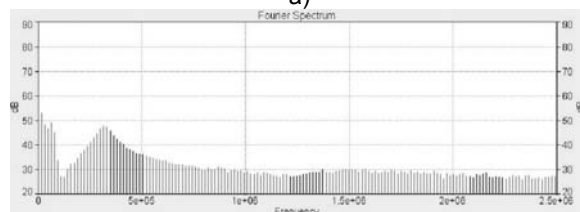


Рисунок 8 – Изменение тестирующего импульса при продольной диагностике трансформатора

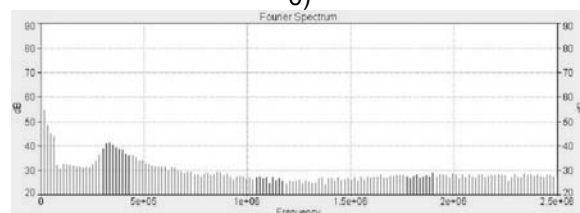
При продольной диагностике одноимённых фаз спектрограммы при подаче тестового сигнала на обмотку высшего напряжения и на обмотку низшего напряжения очень похожи (рисунок 9). Это свидетельствует о первостепенном влиянии при диагностике по такой схеме параметров магнитной цепи, участвующей в преобразовании сигнала и его передаче с обмотки одного напряжения на обмотку другого напряжения. На спектрограмме можно отметить два локальных максимума амплитуд при частотах в 70 кГц и 320 кГц. Имеется также локальный минимум амплитуд, но частоты, при которых он наблюдается, отличаются при разных направлениях продольной диагностики. Анализируя спектрограмму, полученную при фиксации сигнала с нулевого вывода обмотки другого напряжения (рисунок 9, в), можно заметить, что общий характер изменения схож с характером, наблюдаемым при фиксации сигнала с выводов фаз. Это свидетельствует о доминировании в формировании диагностического сигнала на выводе нейтрали участка магнитопровода фазного вывода, на который подаётся тестовый сигнал. Отличие состоит в наличии области равных амплитуд в диапазоне частот от 100 до 250 кГц, которая свидетельствует о сложном характере взаимодействия в магнитной цепи трансформатора. Можно прийти к заключению о том, что магнитный поток, проходящий по магнитопроводу, испытывает воздействие при трансформации тестового сигнала, проходящего по обмоткам других. В результате такого взаимодействия сигнала указанного диапазона частот компенсируются, и значения амплитуд этих частот принимают примерно одинаковые значения.



а)



б)



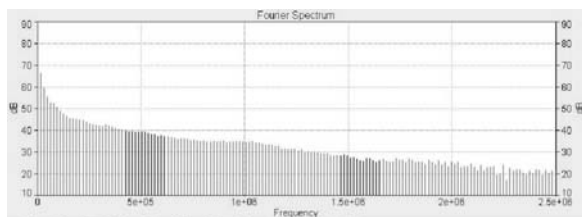
в)

Рисунок 9 – Спектрограммы диагностического сигнала при продольной диагностике одноимённых фаз с подачей тестовых импульсов на обмотку высшего (а) и низшего (б) напряжения, снятия диагностического импульса с нулевого вывода обмотки другого напряжения (в)

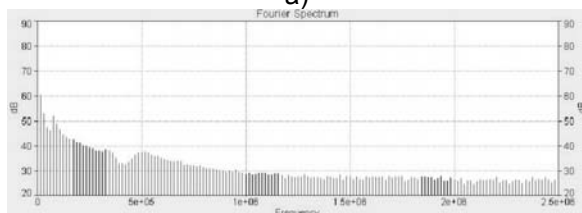
Для понимания характера процесса были проведены дополнительные исследования, которые состояли в продольной диагностике разноимённых фаз. Например, диагностический сигнал подавался на вывод фазы А высшего напряжения, а фиксировался на выводе фазы В низшего напряжения. В результате выполнения таких исследований с учётом направления передачи сигнала через трансформатор получены спектрограммы, представленные на рисунке 10. В первом случае тестовый сигнал подавался на вывод обмотки высшего напряжения, а фиксировался на обмотке низшего напряжения. Во втором случае – наоборот. Для сравнения фазы взяты одни и те же. Анализируя закономерности изменения амплитудного состава спектрограмм можно сделать вывод о том, что при подаче тестового сигнала на вывод обмотки высшего напряжения амплитуды неравномерно уменьшаются и имеются две области локальных максимумов амплитуд с частотами около 500 кГц и 1 МГц. При подаче тестового сигнала на обмотку низшего напряжения спектрограмма внешне схожа со спектрограммой, полученной при продольной диагностике одноимённых фаз. Отличие состоит в том, что области локальных максимумов

СПЕКТРАЛЬНЫЙ СОСТАВ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА ПРИ ТЕСТИРОВАНИИ ОБМОТОК СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПРЯМОУГОЛЬНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ НАПРЯЖЕНИЯ

мов и минимумов не так сильно отличаются по амплитуде. Можно сделать вывод о том, что диагностический сигнал, проходя по магнитной цепи, имеет более информативную спектрограмму при продольной диагностике одноимённых фаз. При диагностике разноимённых фаз протекают процессы сложения амплитуд отдельных частот, в результате чего может быть получена спектрограмма с равномерно убывающей амплитудой.



а)



б)

Рисунок 9 – Спектрограммы диагностического сигнала при продольной диагностике одноимённых фаз с подачей тестовых импульсов на обмотку высшего (а) и низшего (б) напряжения

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 электро-

магнитных колебаний. Как уже было показано выше, характер спектрограмм иногда очень существенно отличается в зависимости от того, каким образом на активную часть трансформатора попадает тестирующий импульс, и какой путь преобразований претерпевает сигнал, проходя по ней. Разнообразие амплитудного состава спектрограмм 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. 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: Общественно-научный периодический журнал. Бюллетень оперативной научной информации. Социальные, информационные и энергетические проблемы региона. – №82. – Томск: Томский государственный университет, 2006. – С. 15 – 23.
3. 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.