

Николаев Роман Николаевич

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСФОРМАТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ
ДЛЯ РАСЧЕТА УСТАНОВИВШИХСЯ И ПЕРЕХОДНЫХ
ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

Специальность: **05.14.02** — Электрические станции и электроэнергетические системы

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Научный руководитель:

доктор технических наук,
профессор

Евдокунин Георгий Анатольевич

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,
профессор

Кадомская Кира Пантелеймоновна

кандидат технических наук,
доцент

Семенов Константин Николаевич

Ведущая организация:

ОАО «Электрозавод»

Защита состоится «25» ноября 2011 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.11 при ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая, 29, главный корпус, аудитория 325.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан « » _____ 2011 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

к.т.н., доцент

Попов М.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

В настоящее время для моделирования силовых трансформаторов используются Т- или П-образные схемы замещения («классическая» схема замещения трансформатора) и их модификации, параметры которых определяются на основании экспериментальных данных. Так, например, для расчета установившихся процессов (расчет установившегося режима или расчет токов короткого замыкания) параметры для типовой электрической схемы замещения трансформатора определяются из опытов холостого хода и короткого замыкания. Проблем с определением указанных параметров не возникает, так как они приведены в паспортных данных на трансформатор. Однако, при расчетах некоторых переходных процессов (например, броска тока намагничивания) в схеме замещения необходимо задавать шунт намагничивания, представляющий нелинейное индуктивное сопротивление в виде экспериментально измеренной зависимости потокосцепления от тока $\Psi(i)$. Определение нелинейной зависимости $\Psi(i)$ для силовых трансформаторов является трудоемкой задачей, а пользоваться приближенными моделями $\Psi(i)$ нецелесообразно, так как расчет с такой характеристикой приводит к неверному результату. Кроме этого для многообмоточных трансформаторов возникают вопросы о корректности «классических» схем замещения трансформаторов. В частности, в диссертации приведена схема замещения двухобмоточного трансформатора, полученная по представленной в работе методике моделирования силового оборудования на основании совместного применения схем замещения электрической и магнитной цепей, которая соответствует «классической» схеме замещения двухобмоточного трансформатора, в то время как, схема замещения трехобмоточного трансформатора, полученная по исследуемой в работе методике, отличается от «классической» схемы замещения трехобмоточного трансформатора.

В связи с этим, в последнее время получила развитие альтернативная методика моделирования трансформаторов (реакторов). Указанная методика моделирования силового оборудования уходит от общепринятых представлений об электрических схемах замещения и строится на основании совместного применения схем замещения электрической и магнитной цепей. Схема замещения

электрической цепи состоит из двух типов элементов: источника электродвижущей силы и активного сопротивления. Схема замещения магнитной цепи содержит источники магнитодвижущей силы и магнитные сопротивления. Важной особенностью, отличающей представленный в работе метод моделирования трансформатора от других методов, является то, что все необходимые параметры схем замещения определяются из конструктивных размеров магнитной системы трансформатора, размеров обмоток и свойств электротехнической стали магнитопровода, что исключает необходимость в проведении натуральных экспериментов. Следует отметить, что данная методика моделирования вызывает интерес не только со стороны научно-исследовательских организаций, но и со стороны заводов-изготовителей силового оборудования, что свидетельствует о ее актуальности.

Цель работы.

Разработка методики моделирования трансформатора с помощью совместного применения схем замещения электрической и магнитной цепей трансформатора для выполнения расчетов электромагнитных переходных процессов при возникновении аварийных событий в энергосистеме. Проведение научно-исследовательских работ по внедрению фазоповоротного комплекса, состоящего из автотрансформатора и вольтодобавочного трансформатора, на электропередаче 500 кВ энергосистемы Казахстана. Выполнение расчетов, которые подтверждают необходимость использования усовершенствованной модели трансформатора при моделировании переходных процессов в электрических сетях и необходимости учета гистерезисных свойств материала.

Основные решаемые задачи.

- разработка и реализация в виде программного комплекса методики моделирования трансформаторного оборудования на основе совместного применения схем замещения электрической и магнитной цепей и разработка рекомендаций по определению необходимых параметров, которые используются в качестве исходных данных в методике моделирования, рассматриваемой в диссертации;

- моделирование сложных по конструкции силовых трансформаторов в установившихся и переходных режимах работы на примере фазоповоротного трансформаторного комплекса;

- создание методики и алгоритма моделирования гистерезисных свойств стали;

- моделирование и анализ возникновения возможных при эксплуатации опасных режимов работы трансформатора, способных привести к его повреждению (броски тока намагничивания и резонансные явления).

Методика проведения исследований

Основным методом исследований является математическое моделирование электромагнитных переходных процессов и установившихся режимов в расчетных схемах энергосистемы для различных режимов работы трансформатора в специально разработанной компьютерной программе.

Научная новизна:

- усовершенствована методика моделирования трансформаторного оборудования с произвольной конфигурацией магнитной и электрической цепей, основанная на совместном решении уравнений схем замещения электрической и магнитной цепей, путем дополнения алгоритма моделирования гистерезисных свойств электротехнической стали (статического и динамического гистерезиса) на базе современных представлений о гистерезисе;

- для выбранной конструкции фазоповоротного комплекса, состоящего из автотрансформатора и вольтодобавочного трансформатора, впервые получены схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательности и определены параметры схемы замещения в зависимости от отпаек РПН;

- при создании модели трансформаторного оборудования применяется совместное решение уравнений, записанных для схем замещения электрической и магнитной цепи силового трансформатора, с уравнениями, которые моделируют полную модель гистерезиса и учитывают собственные и взаимные емкости частей обмоток;

- обоснована необходимость проведения компьютерных расчетов для определения реальной величины броска тока намагничивания в силовом трансформаторном оборудовании.

Практическая ценность:

- выполнены научно-исследовательские работы, результатом которых явилось внедрение фазоповоротного трансформатора в ОЭС Казахстана;
- получены схемы замещения фазоповоротного трансформатора для прямой, обратной и нулевой последовательностей, использованные проектными и эксплуатирующими организациями для анализа рабочих и аварийных режимов сети, содержащей фазоповоротный трансформатор;
- разработаны практические рекомендации для регулирования коэффициентов трансформации продольного и поперечного регуляторов ФПТ для обеспечения необходимого перетока мощности по заданному сечению;
- в работе приведено обоснование перехода от общепринятых представлений об электрических схемах замещения к методике моделирования силового оборудования на основании совместного применения схем замещения электрической и магнитной цепей при расчетах переходных процессов;
- получен способ и алгоритм определения параметров схемы замещения магнитной цепи трансформатора для использования их в исследуемой методике моделирования трансформаторного оборудования;
- разработана и реализована в виде программного комплекса методика моделирования трансформаторного оборудования на основе схем замещения электрической и магнитной цепей с учетом гистерезисных свойств материала;
- для различных схем соединения обмоток трансформаторов в работе приведен сравнительный анализ максимальной величины броска тока намагничивания, полученной по теоретической формуле, со значением величины, полученной при компьютерном моделировании, и обоснована необходимость использования компьютерных расчетов для выявления максимальной величины броска тока намагничивания;
- в работе определены параметры электрической схемы замещения внешней сети, которые необходимо учитывать для корректного моделирования повторных включений трансформатора под напряжение;
- разработана методика определения опасной зоны воздушной (кабельной) линии, при возмущениях на которой (включение линии электропередач под

напряжение или возникновение трехфазного короткого замыкания), могут возникнуть резонансные явления в обмотках трансформатора.

Реализация результатов работы

Результаты работы использованы при реализации проекта внедрения фазоповоротного трансформатора в ОЭС Казахстана. На основе разработанных схем замещения фазоповоротного комплекса были проведены исследования различных режимов работы фазоповоротного комплекса.

Другим направлением применения результатов работы является использование исследуемой в диссертации методики моделирования трансформаторного оборудования с произвольной конфигурацией магнитной и электрической цепей при расследовании причин повреждения силовых трансформаторов.

Апробация работы и достоверность результатов

Результаты работы докладывались на сессии CIGRE в докладе «Система РЗА фазорегулирующего устройства сверхвысокого напряжения». Методика моделирования фазоповоротного трансформатора и результаты работы вошли в состав работы (отчет по НИР), выполненной НТЦ «Энергосетьпроект» в виде Проекта электропередачи 500 кВ в энергосистеме Казахстана. Достоверность предложенных выводов и рекомендаций обеспечивается применением современных методов моделирования магнитных свойств материалов, а также сопоставлением полученных результатов с результатами работ других исследовательских групп. Обоснованность выводов по части работы, касающейся фазоповоротного трансформатора, подтверждена опытом эксплуатации электропередачи 500 кВ.

Публикации.

Результаты выполненных исследований опубликованы в 4 печатных работах, в том числе в 2 изданиях из списка ВАК Минобрнауки России.

Структура работы.

Диссертационная работа состоит из 7 глав и списка используемой литературы из 50 наименований. Работа изложена на 231 страницах, содержит 142 рисунка и 26 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведены основные результаты исследований специалистов и рассмотрены современные методы и подходы к моделированию силового оборудования в электроэнергетических системах. Также в данной части работы обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и основные задачи работы, приведены положения, отражающие научную новизну и практическую ценность работы.

Первая глава посвящена моделированию силового трансформаторного оборудования в электроэнергетических системах в установившихся нормальных и аварийных режимах работы энергосистемы. В главе рассмотрена актуальная проблема перераспределения потоков мощности в энергосистеме между двумя параллельными сечениями разных классов напряжений. Для проведения исследования была выбрана существующая объединенная энергосистема Казахстана. В данной части описана специфика работы ОЭС Казахстана и обоснована необходимость применения фазопоротного трансформатора для перераспределения мощности в рассматриваемом сечении. В работе представлены расчеты электрических режимов, на основании которых был выбран оптимальный угол между напряжениями по концам электропередачи, создаваемый фазопоротным трансформатором, который обеспечил, с одной стороны, необходимую загрузку вновь введенной линии электропередач ВЛ 500 кВ Жетыгара-Ульке, а с другой – снизил транзитные перетоки по сечению Россия-Казахстан. В работе представлена схема фазопоротного комплекса, которая состоит из автотрансформатора АОДЦТН-167000/500/230 и линейного трехфазного вольтодобавочного трансформатора ЛТДЦТНФ-400000/220. Для предложенной схемы фазопоротного комплекса составлены электрические схемы замещения, для которых была записана система электрических уравнений баланса токов и напряжений каждой фазы. На основании уравнений была составлена эквивалентная схема замещения фазопоротного комплекса для токов прямой, обратной и нулевой последовательностей.

Результатом выполнения расчетов и исследований режимов работы фазопоротного комплекса в первой главе диссертации является его внедрение в ОЭС Казахстана и подготовка необходимой документации для расчета

электрических режимов, статической и динамической устойчивости и токов короткого замыкания в существующих расчетных программах.

В связи с неоднозначностью «классических» схем замещения трансформаторного оборудования для многообмоточных трансформаторов при моделировании переходных режимов работы и возникающими вопросами по определению их параметров применение данных схем замещения приводит к неправильному результату. Поэтому в диссертации для расчета переходных процессов в сетях с фазопоротным комплексом применена методика моделирования, основанная на совместном применении схем замещения электрической и магнитной цепей.

Вторая глава посвящена разработке уточненной методики моделирования силовых трансформаторов. Представленная методика позволяет моделировать трансформаторы любой конструкции с помощью совместного применения схем замещения электрической и магнитной цепей трансформаторного оборудования. Отличительной особенностью такого моделирования является то, что все необходимые параметры схемы замещения трансформатора определяются из конструктивных размеров его магнитной системы и свойств электротехнической стали магнитопровода, что позволяет не проводить дополнительные экспериментальные исследования. Под конструктивными данными понимают следующие параметры: активное сопротивление обмотки, количество витков обмотки, размеры и сечение магнитной системы трансформатора; а под свойствами электротехнической стали магнитопровода – петлю статического и динамического гистерезиса в виде зависимости напряженности магнитного поля от индукции $H(B)$.

В представленной методике трансформатор моделируется схемами замещения электрической и магнитной цепи. Схема замещения электрической цепи обмотки (части обмотки) моделируется активным сопротивлением, которое отражает потери активной мощности в обмотке, и источником электродвижущей силы, который отражает закон изменения электромагнитной индукции. В соответствии с таким представлением процессы, происходящие в электрической схеме замещения трансформатора, описываются следующей формулой:

$$u_j = R_j i_j + \sum w_j \cdot \frac{d\Phi_i}{dt},$$

где j -индекс - номер узла в схеме замещения электрической цепи;

i -индекс - номер узла в схеме замещения магнитной цепи;

R_j - активное сопротивление j обмотки;

w_j - количество витков в j обмотке;

Φ_i - i магнитный поток, который сцепляется с j обмоткой.

В работе подробно описана методика составления схемы замещения магнитной цепи трансформатора, которая моделируется магнитными сопротивлениями R_i и магнитодвижущими силами $F_i = i_j \cdot w_j$. Магнитные сопротивления отражают пути замыкания магнитного потока в воздухе (масле) и магнитопроводе трансформатора, в связи с этим магнитные сопротивления разделяют на линейные и нелинейные соответственно. Каждое магнитное сопротивление определяется в зависимости от типа по соответствующим параметрам, поэтому в диссертации подробно описан способ определения данных элементов. В общем виде магнитное сопротивление определяется в соответствии с формулой:

$$R = \frac{l}{\mu_a \cdot S},$$

где l - длина магнитного участка;

S - сечение магнитного участка;

μ_a - магнитная проницаемость.

Процессы, происходящие в схеме замещения магнитной цепи трансформатора, описываются следующей системой уравнений:

$$\sum \Phi_i = 0,$$

$$\sum_{i=1}^p \Phi_i \cdot R_i = \sum_{j=1}^n i_j \cdot w_j.$$

Представленные системы уравнений, записанные для схем замещения электрической и магнитной цепи трансформатора, позволяют моделировать трансформатор в различных режимах его работы.

В работе проведен аналитический расчет простейшего двухобмоточного трансформатора по представленной методике, в результате которого получена «классическая» Т-образная электрическая схема замещения двухобмоточного

трансформатора. Параметры схемы замещения, индуктивность и взаимная индуктивность, определяются по конструктивным (геометрическим) размерам магнитной системы трансформатора. В то время как эквивалентная схема замещения трехобмоточного трансформатора, полученная по исследуемой в работе методике, отличается от «классической» схемы замещения трехобмоточного трансформатора.

В заключительной части второй главы приведена одна из возможных методик преобразования имеющейся системы уравнений схемы замещения магнитной цепи к виду, удобному для использования в компьютерном расчете совместно с уравнениями, составленными для схемы замещения электрической цепи.

Дополнительным совершенствованием модели силового трансформатора является корректное описание процессов, происходящих в его магнитной системе. Поэтому **в третьей главе** представлена методика описания процессов, происходящих в листовой холоднокатаной стали, с использованием принципа разделения общих потерь в ферромагнетике на составляющие, обусловленные гистерезисом, макро- и микроскопическими вихревыми токами. При условии равномерности распределения магнитного потока по сечению листа (отсутствие выраженного поверхностного эффекта) упомянутое разделение потерь эквивалентно разделению магнитного поля $H(t)$ на поверхности листа на три слагаемые, называемые гистерезисным полем $H_g(t)$, классическим полем $H_k(t)$ и дополнительными полем $H_d(t)$. Таким образом, напряженность магнитного поля в ферромагнетике определяется по следующему выражению (см. рис. 1):

$$H(t) = H_g(t) + H_k(t) + H_d(t)$$

Каждое из представленных слагаемых вычисляется в соответствии с приведенным в диссертации алгоритмом. Следует отметить, что составляющая, отвечающая статическому гистерезису ($H_g(t)$) от производной частоты не зависит, в силу своей природы возникновения, а динамический гистерезис («вихревая» $H_k(t)$ и «вязкостная» $H_d(t)$ составляющие гистерезиса), напротив, зависит от производной частоты. Таким образом, на высоких частотах увеличиваются потери активной мощности в трансформаторе.

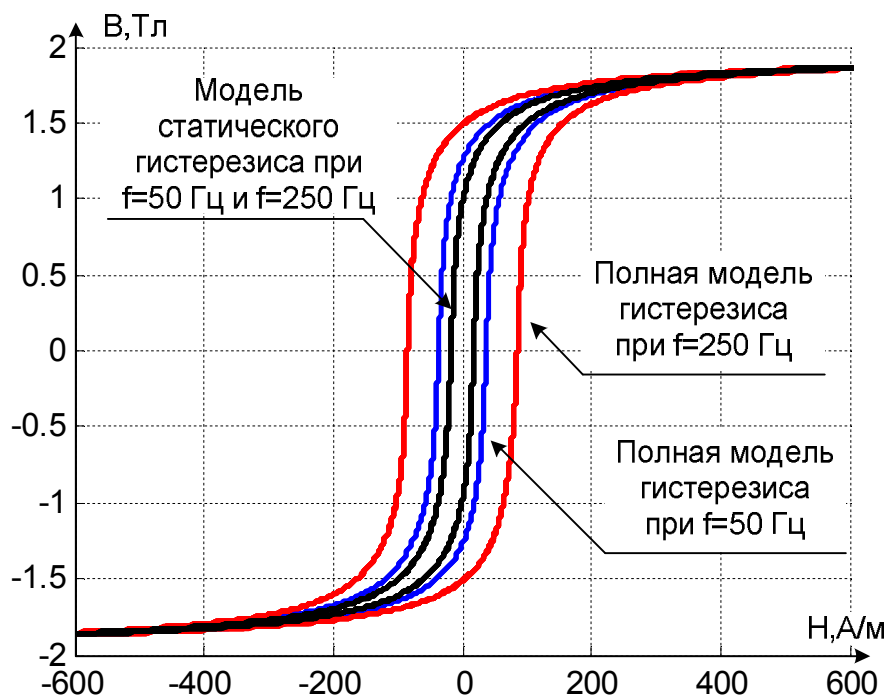


Рис.1 Зависимость петли гистерезиса от изменения частоты

В работе приведены сравнительные расчеты процесса включения трансформатора под напряжение для двух вариантов моделирования кривой намагничивания $H(B)$: с учетом полной модели гистерезиса и без учета гистерезисных свойств, с помощью безгистерезисной кривой намагничивания. В результате, был сделан вывод, что неучет гистерезисных свойств стали приводит к тому, что при отключении трансформатора от источника напряжения остаточная индукция стремится к нулевому значению. В результате, повторное включение трансформатора происходит с нулевыми начальными значениями индукции магнитного поля (как и при первом включении), что не приводит к увеличению значения броска тока намагничивания.

Учет гистерезисных свойств материала по представленной методике позволяет моделировать сложные процессы коммутации трансформатора (многократные включения/отключения), так как позволяет сохранять остаточную индукцию в расчетной модели при отключении трансформатора от сети. При неблагоприятном повторном включении трансформатора под напряжение бросок тока намагничивания может существенно возрасти (см. рис. 3), так как включение происходит с ненулевой начальной индукцией в магнитной схеме трансформатора. Также следует обратить внимание на то, что остаточная индукция в магнитной системе трансформатора отличается по величине от магнитной индукции в момент

отключения трансформатора (см. рис. 2), так как при отключении возникает переходный процесс в контуре между электромагнитной моделью трансформатора, сосредоточенной емкостью и проводимостью трансформатора на землю. Соответственно, для проведения правильного анализа при моделировании повторных включений трансформатора необходимо учитывать полную модель гистерезиса.

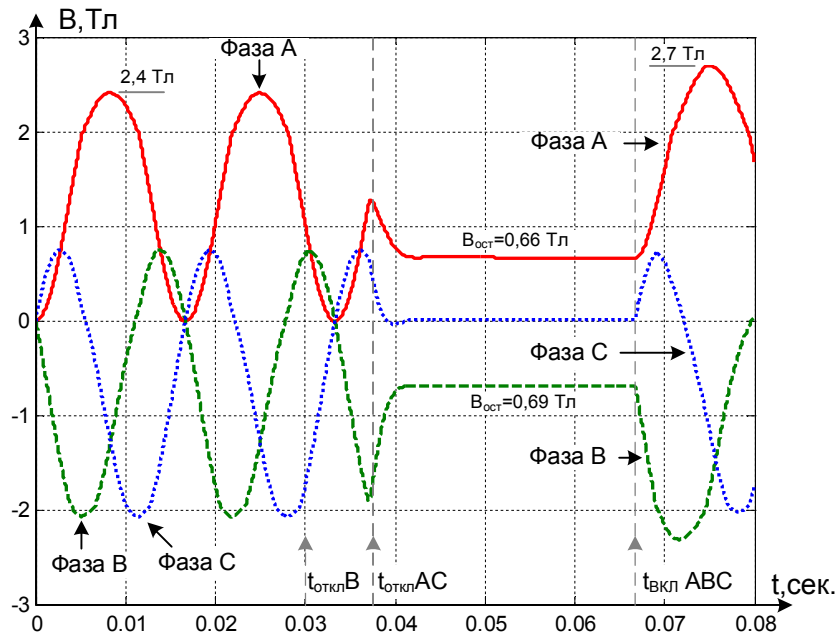


Рис.2 Изменение индукции в центральном стержне трансформатора

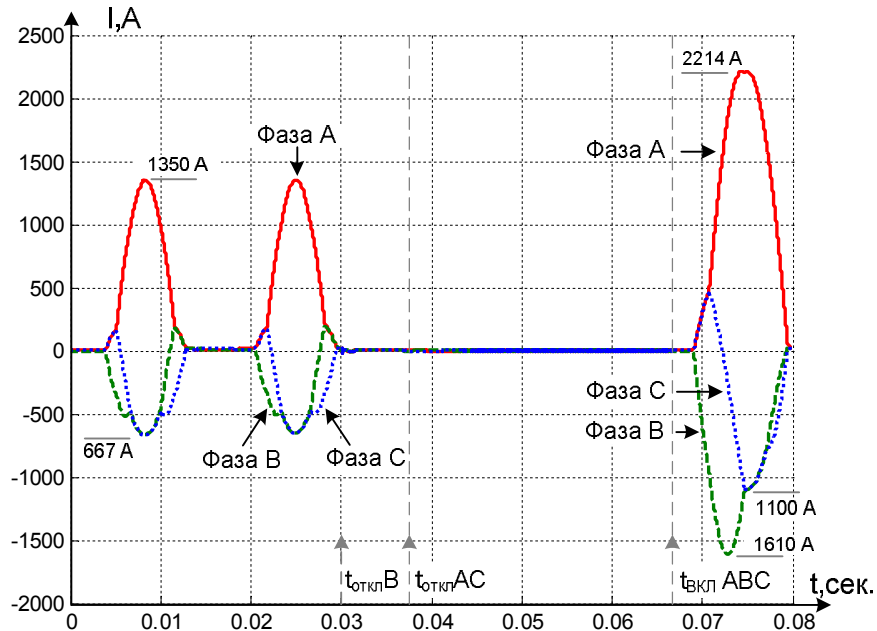


Рис.3 Бросок тока намагничивания трансформатора

Представленная методика также позволяет более точно моделировать режим холостого хода электротехнического устройства (трансформатора, реактора и т.д.),

что в свою очередь позволяет уточнить гармонический состав тока холостого хода (или рабочего режима) устройства и является важной задачей при проектировании управляемых реакторов для правильного определения необходимости и мощности фильтров высших гармоник. Сравнительный расчет показывает, что учет или неучет гистерезисных свойств стали оказывает влияние на амплитудное значение и форму тока холостого хода (см. рис. 4) как на основной частоте, так и на высших частотах в переходных процессах (см. рис. 5).

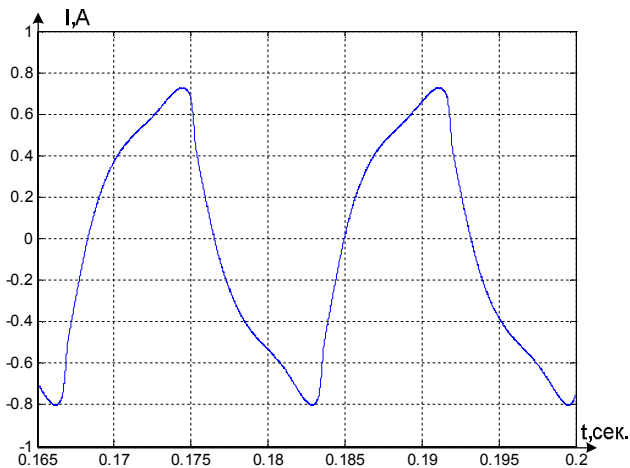


Рис. 4 Ток холостого хода однофазного автотрансформатора в установившемся режиме работы ($V_n=1,5$ Тл)

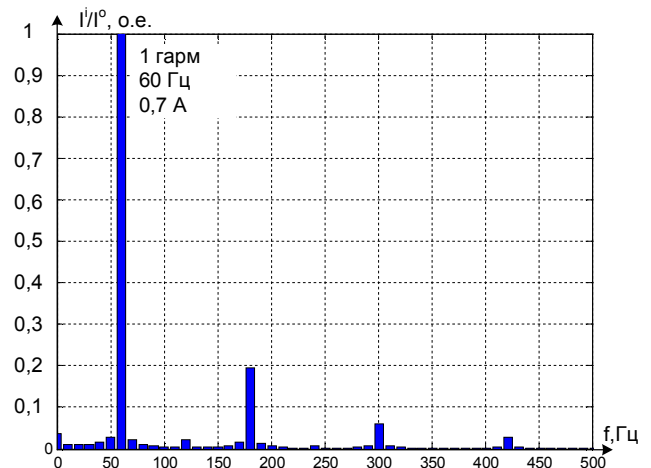


Рис. 5 Гармонический состав тока холостого хода в установившемся режиме работы ($V_n=1,5$ Тл)

Таким образом, в результате проведенного исследования работы компьютерной модели трансформатора было получено экспериментальное подтверждение целесообразности учета гистерезисных свойств материала и необходимости использования в расчетах усовершенствованной модели трансформатора.

В четвертой главе рассмотрены основные аспекты по созданию программной оболочки для расчета электромагнитных переходных процессов в схемах замещения электрических и магнитных цепей различной конфигурации. Для решения данной задачи в программном комплексе реализовано два модуля: графический интерфейс и система управления базой данных, математическое ядро и модуль визуализации.

Для реализации «**модуля графического интерфейса и системы управления базой данных**» был выбран пакет векторной графики MS Visio со встроенной средой программирования Microsoft Visual Basic for Applications (VBA), которая

позволяет, с одной стороны, расширять функциональные возможности пакета, а с другой – легко интегрировать MS Visio с внешними приложениями.

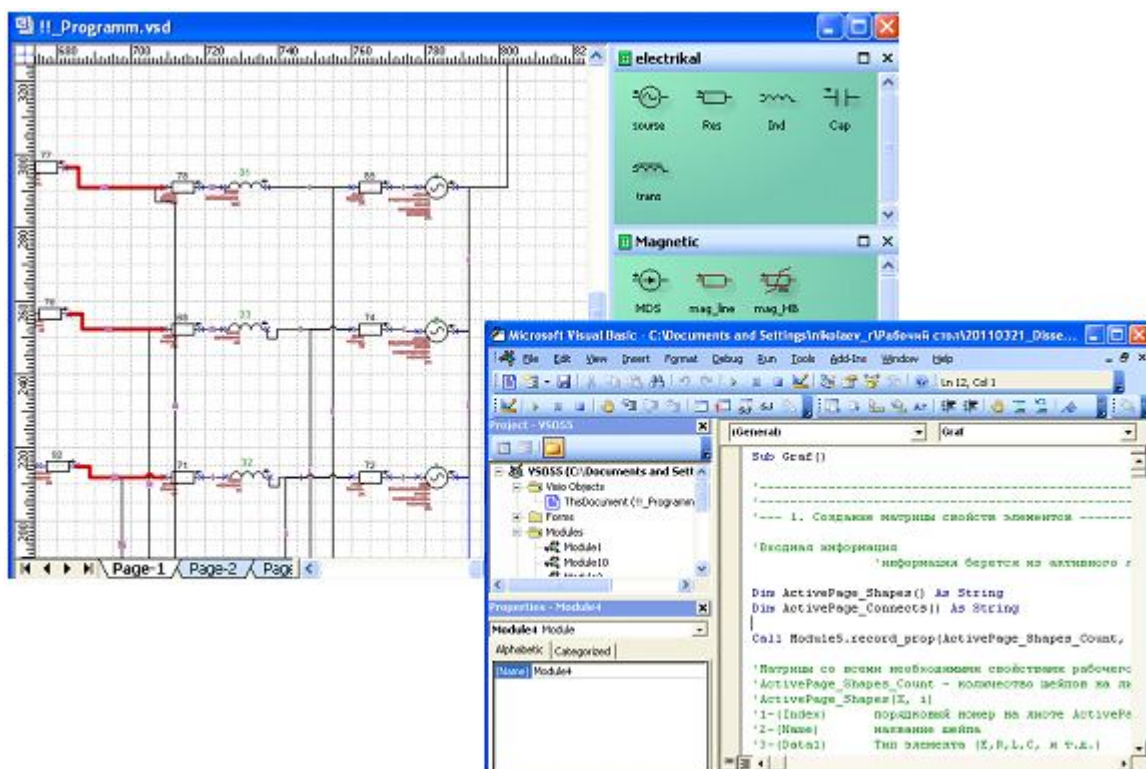


Рис. 6 MS Visio

На встроенном языке программирования VBA был реализован (написан) макрос (см. рис. 6), который считывает информацию о расчетной схеме с рабочего окна MS Visio, преобразует ее и создает два текстовых файла, содержащих информацию о схемах замещения электрической и магнитной цепей.

Для реализации «**математического ядра и модуля визуализации и обработки полученных результатов**» было выбрано программное обеспечение фирмы The MathWorks: Matlab со встроенным языком программирования. На встроенном языке программирования была написана программа, которая считывает информацию о расчетной схеме с двух внешних текстовых файлов и производит расчет в соответствии с заданным алгоритмом (см. рис. 7). Все переменные, которые были определены в ходе расчетов, хранятся в рабочем поле Workspace, в результате Matlab имеет возможность последующей обработки полученной информации, построения графиков, хранения и загрузки результатов расчета во внешние файлы.

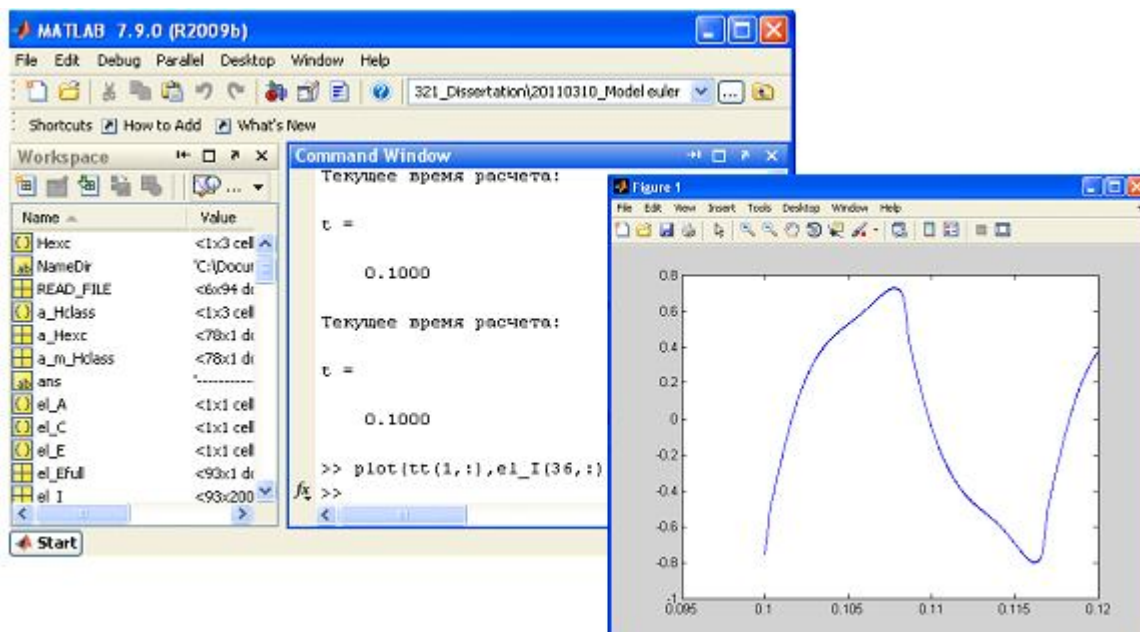


Рис.7 Matlab

Таким образом, с помощью использования двух приложений (Visio, Matlab) было получено полноценное программное обеспечение для редактирования, хранения, расчета и обработки схем замещения электрической и магнитной цепей.

В пятой главе в программном обеспечении, разработанном для расчета переходных процессов в трансформаторном оборудовании, была создана модель ОЭС Казахстана с фазопоротным комплексом на основе совместного решения уравнений, составленных для схем замещения электрической и магнитной цепей, и проведен ряд расчетов, которые подтвердили корректность полученных ранее (глава 1) схем замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей. В схеме замещения фазопоротного комплекса и энергосистемы Казахстана были проведены различные расчеты: включение фазопоротного комплекса под напряжение, расчеты установившихся и переходных режимов работы (такие как: набор и сброс нагрузки по линии с помощью фазопоротного комплекса) и определены максимальные значения токов короткого замыкания. На основе проведенных расчетов переходных процессов в энергосистеме Казахстана с фазопоротным комплексом была выполнена работа по выбору уставок релейной защиты для фазопоротного трансформатора, результаты работы были опубликованы в Сборнике докладов Международной научно-технической конференции.

В шестой главе подробно рассмотрены переходные процессы, которые возникают в силовых трансформаторах при включении их под напряжение (броски тока намагничивания). В работе показано, что рекомендуемая формула для оценки величины броска тока намагничивания справедлива только для простых случаев, и, как правило, не учитывает схему и группу соединения обмоток трансформатора, топологию магнитной цепи трансформатора. При компьютерном моделировании однофазного автотрансформатора бросок тока намагничивания совпал с теоретически полученным максимальным значением броска тока. Однако, при рассмотрении трехфазных схем замещения трансформатора это значение может быть как меньше, так и больше теоретически рассчитанного значения броска тока намагничивания. В рассмотренном в диссертации примере включения автотрансформатора под напряжение с разбросом включения фаз и нулевой начальной индукцией бросок тока намагничивания получился на 38% больше теоретически рассчитанного значения и составил $I_{ВКЛ} = 3,4$ кА. Полученные значения бросков тока намагничивания сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Величины бросков тока намагничивания

Теоретический расчет	Компьютерное моделирование	
	Трехфазное включение выключателя	Включение выключателя с разбросом включения фаз
1. Нулевая начальная индукция трансформатора		
$I_{ВКЛ} = 2,466$ кА	$I_{ВКЛ} = 2,05$ кА	$I_{ВКЛ} = 3,4$ кА
Процентное соотношение броска тока от теоретически рассчитанного броска тока намагничивания:		
100%	83 %	138%
2. Начальная индукция трансформатора в фазе А равна 0,8 Тл		
$I_{ВКЛ} = 4,259$ кА	$I_{ВКЛ} = 3,67$ кА	$I_{ВКЛ} = 5,2$ кА
Процентное соотношение броска тока от теоретически рассчитанного броска тока намагничивания:		
100%	86 %	122%

Кроме этого, в работе показано, что бросок тока намагничивания сравним по величине с током трехфазного короткого замыкания. Так, например, при нулевой начальной индукции бросок тока намагничивания составляет 52% от амплитудного

значения тока трехфазного короткого замыкания ($I_A = 6,56$ кА), а при ненулевой начальной индукции ($B_{остА}=0,8$ Тл) – увеличивается до величины 79%.

Амплитудное значение броска тока намагничивания ограничивается сопротивлением сети и сопротивлением обмотки трансформатора в воздухе, а ток трехфазного короткого замыкания ограничивается сопротивлением сети и взаимным сопротивлением между обмотками. Поэтому теоретически возможно, что величина броска тока намагничивания будет превышать величину тока трехфазного короткого замыкания и приближаться к значению тока, используемого при испытаниях трансформатора на электродинамическую стойкость. В рассматриваемом примере амплитуда тока трехфазного короткого замыкания составляет 72% от амплитудного значения тока трехфазного короткого замыкания, полученного при испытаниях трансформатора на электродинамическую стойкость ($I_A = 9,05$ кА), в то же время бросок тока намагничивания при нулевой начальной индукции составляет 37% от этой величины, а при ненулевой начальной индукции ($B_{остА}=0,8$ Тл) - увеличивается до величины 57%. Следует заметить, что броски тока намагничивания имеют большую амплитуду и длительность протекания, что вызывает потенциальную опасность повреждения обмоток трансформатора из-за возможно чрезмерных динамических усилий или снижение срока его службы, поэтому необходимо проводить мероприятия по снижению величины броска тока намагничивания.

Также в работе показано, что на величину остаточной индукции трансформатора большое влияние оказывает величина емкости между силовым трансформатором и выключателем. Так, например, при емкости 1000 пФ со стороны ВН и СН автотрансформатора остаточная индукция в фазе А получилась равной 0,8 Тл, а при значении емкости 4000 пФ величина остаточной индукции уменьшилась до величины 0,4 Тл. В свою очередь, величина остаточной индукции оказывает влияние на значение броска тока намагничивания при повторном включении трансформатора, так, например, при емкости 1000 пФ максимальная величина броска тока намагничивания при повторном включении составила 3,67 кА, а при емкости 4000 пФ за счет снижения значения остаточной индукции максимальная величина броска тока намагничивания при повторном включении составила 2,765 кА.

В седьмой главе рассмотрены резонансные процессы, которые могут возникать в трансформаторе при включении его под напряжение или при возникновении короткого замыкания в непосредственной близости от трансформатора. Резонансные процессы вызывают повышение напряжения на обмотке в несколько раз, что может привести к пробое изоляции и к повреждению силового трансформатора. В работе представлена методика определения с помощью компьютерных расчетов опасных длин линий, при возмущениях на которых (включение линии электропередач под напряжение или возникновение трехфазного короткого замыкания), могут возникнуть резонансные явления в обмотках трансформатора. В обмотках трансформатора наблюдаются резонансные явления в том случае, если частота собственных (свободных) колебаний линии совпадает с резонансной частотой автотрансформатора. Полученные результаты по обоим расчетным случаям были сведены в таблицу (см. Таблица 2).

Таблица 2. Максимальные перенапряжения

Обмотка	Номинальное напряжение (амплитудное), кВ	Максимальное полученное напряжение, кВ	
		Включение автотрансформатора под напряжение	Близкое трехфазное короткое замыкание
ВН	$\frac{345}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{2} = 281,7$	580 кВ	280 кВ
СН	$\frac{230}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{2} = 187,8$	более 700 кВ	более 600 кВ
НН (линейное напряжение)	$24,9 \cdot \sqrt{2} = 35,2$	более 150 кВ	более 130 кВ
НН (фазное напряжение)	$\frac{24,9}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{2} = 20,3$	более 70 кВ	более 60 кВ

Из таблицы видно, что при совпадении частоты переходного процесса в линии электропередач с резонансной частотой автотрансформатора в обмотках могут

наблюдаться повышенные уровни напряжения, которые превышают номинальное напряжение в несколько раз. Описанные процессы могут вызвать пробой масляного промежутка трансформатора и дальнейшее повреждение силового трансформатора.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. В диссертационной работе для выбранной конструкции фазоповоротного комплекса, состоящего из автотрансформатора и вольтодобавочного трансформатора, впервые получены схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей для использования их при расчетах электрических режимов, статической и динамической устойчивости и токов короткого замыкания в объединенной энергосистеме Казахстана. Результаты работы использованы при внедрении фазоповоротного комплекса в электроэнергетической системе Казахстана.

2. В работе доработана методика моделирования трансформаторного оборудования на основе совместного применения схем замещения электрической и магнитной цепей с учетом гистерезисных свойств стали магнитопровода трансформатора. Важной особенностью, отличающей представленный в работе метод моделирования трансформатора от других методов, является то, что все необходимые параметры схем замещения определяются из конструктивных размеров магнитной системы трансформатора и свойств электротехнической стали магнитопровода, а также размеров и параметров обмоток, что исключает необходимость в проведении дополнительных экспериментальных исследований по определению расчетных параметров. В соответствии с предложенной методикой был разработан программный комплекс, позволяющий рассчитывать переходные процессы в трансформаторах с произвольной конфигурацией магнитной и электрической цепи трансформатора.

3. С помощью разработанного программного комплекса был проведен ряд расчетов переходных процессов в трансформаторе, возникающих при включении трансформаторов (броски тока намагничивания), а также в случаях резонансных явлений. В результате выполнения анализа проведенных расчетов была подтверждена:

- необходимость проведения компьютерных расчетов для определения максимальной величины броска тока намагничивания при включении трансформатора под напряжение (было показано, что рекомендуемая формула для оценки величины броска тока намагничивания справедлива только для простых случаев);

- необходимость учета гистерезиса для правильного моделирования повторных включений трансформатора под напряжение;

- определены параметры электрической схемы замещения, которые необходимо учитывать для правильного моделирования повторных включений трансформатора под напряжение;

- определены зоны опасных длин воздушной или кабельной линии, при возмущениях на которых (включение линии электропередач под напряжение или возникновение трехфазного короткого замыкания), могут возникнуть резонансные явления в обмотках трансформатора.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. В.К. Ванин, Г.А. Евдокунин, Р.Н. Николаев, М.Г. Попов, А.К. Исаков, Б.К. Оспанов, Н.И. Утегулов. Система РЗА фазорегулирующего устройства сверхвысокого напряжения // Сборник докладов Международной научно-технической конференции «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем». – 2009г. – С.182-192.
2. Г.А. Евдокунин, Р.Н. Николаев, А.К. Исаков, Б.К. Оспанов, Н.И. Утегулов. Фазоповоротный трансформатор впервые в СНГ применен в Казахстане. // Новости электротехники. – 2008. – 6(48). – С.12-16
3. Г.А. Евдокунин, Р.Н. Николаев. Моделирование и анализ переходных процессов в трансформаторах // Научно-технические ведомости СПбГПУ 4-1 (89). – 2009 г. – С.207-215.
4. Г.А. Евдокунин, М.В. Дмитриев, А.С. Карпов, Р.Н. Николаев, Е.Б. Шескин. Компьютерное моделирование управляемых шунтирующих реакторов различного типа и сравнение их технических характеристик // Энергетик.– 2011. – №3. – С. 15-19