

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ИВАНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени В.И. Ленина»



*На правах рукописи*

СНИТЬКО Ирина Сергеевна

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСШИРЕННОГО  
ПОВЕРОЧНОГО РАСЧЕТА В САПР СИЛОВЫХ  
ТРАНСФОРМАТОРОВ НА БАЗЕ ИМИТАЦИОННЫХ  
МОДЕЛЕЙ**

05.13.12. – Системы автоматизации проектирования  
(электротехника, энергетика)

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:  
д.т.н., проф. Тихонов А.И.

Иваново 2022

## Содержание

Принятые обозначения	5
Введение	7
1. Современное состояние проблемы расчета режимов работы объекта проектирования в САПР силовых трансформаторов	14
1.1. Современное состояние САПР силовых трансформаторов	14
1.2. Влияние параметров трансформаторного оборудования на его режимы работы в составе электрических сетей	18
1.3. Современное состояние проблемы имитационного моделирования силовых трансформаторов	23
1.3.1. Модели для расчета параметров короткого замыкания СТ с учетом полей вне магнитной системы	23
1.3.2. Модели для имитации режимов работы силовых трансформаторов	31
1.3.3. Модели для имитации режимов работы участков сетей	33
1.4. Выбор объекта исследования	38
Выводы по первой главе и постановка задачи	39
2. Разработка имитационной модели силового трансформатора с учетом взаимного влияния полей обмоток вне магнитной системы	41
2.1. Разработка моделей для расчета параметров короткого замыкания силовых трансформаторов	42
2.1.1. Обоснование сокращения размерности модели магнитного поля для расчета полей вне магнитопровода	42
2.1.2. Обоснование выбора граничных условий в модели магнитного поля трансформатора	47

2.1.3.	Методика расчета активных сопротивлений в имитационной модели силового трансформатора	50
2.1.4.	Модели для расчета индуктивностей многообмоточных трансформаторов на основе расчета поля вне магнитной системы	56
2.1.5.	Модель для расчета влияния на параметры КЗ обмоток, расположенных на разных стержнях	60
2.1.6.	Модель для расчета сопротивления поля нулевой последовательности	66
2.2.	Разработка имитационных моделей силовых трансформаторов с учетом взаимного влияния полей за пределами магнитопровода	68
2.2.1.	Разработка модели переходных режимов работы СТ с учетом взаимного влияния полей за пределами магнитопровода	68
2.2.2.	Разработка модели для расчета симметричных и несимметричных установившихся режимов СТ с учетом комплексной магнитной проницаемости	73
2.2.3.	Методика построения цифрового двойника СТ с учетом взаимного влияния полей вне магнитной системы	81
2.3.	Разработка методики анализа участков электрических сетей, содержащих силовые трансформаторы	82
	Выводы по второй главе	85
3.	Программная реализация и апробация разработанных имитационных моделей в составе САПР трансформаторов	88
3.1.	Апробация методики определения индуктивностей обмоток	89
3.2.	Программная реализация и анализ моделей установившихся режимов работы трансформаторов	90

3.3.	Апробация моделей переходных режимов работы трансформаторов	93
3.3.1.	Анализ модели учета взаимного влияния полей вне магнитной системы на примере однофазного трансформатора	93
3.3.2.	Анализ модели переходных режимов работы трехфазного двухобмоточного трансформатора	95
3.3.3.	Анализ модели переходных режимов работы трехфазного трехобмоточного трансформатора	101
	Выводы по третьей главе	103
4.	Разработка подсистемы расширенного поверочного расчета САПР трансформаторов с использованием имитационных моделей с учетом взаимного влияния полей вне магнитной системы	104
4.1.	Существующая система САПР СТ	105
4.2.	Разработка подсистемы утосненного поверочного расчета САПР СТ	108
	Выводы по четвертой главе	111
	Заключение	113
	Библиография	116
	Приложения	130

## Принятые обозначения

1. ВН – высшее напряжение
2. ВЧТ – высокочастотный трансформатор
3. ИГЭУ – Ивановский государственный энергетический университет
4. КЗ – короткое замыкание
5. КЭ – конечно-элементный
6. МКЭ – метод конечных элементов
7. КЭМ – конечно-элементная модель
8. ЛЭП – линии электропередач
9. МП – магнитное поле
10. НИОКР – научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы
11. НН – низшее напряжение
12. НС – намагничивающая сила
13. ОДУ – обыкновенные дифференциальные уравнения
14. ПБВ – переключение без возбуждения
15. ПДМ – полевая динамическая модель
16. ПК – персональный компьютер
17. ПО – программное обеспечение
18. РД – руководящий документ
19. РПН – регулирование под нагрузкой
20. САПР – система автоматизированного проектирования
21. СГР – метод среднегеометрических расстояний
22. СН – среднее напряжение
23. СТ – силовой трансформатор
24. ТЗ – техническое задание

25. УКТ – уравнения контурных токов
26. УР – установившийся режим
27. УУН – уравнения узловых напряжений
28. ХХ – холостой ход
29. ЦД – цифровой двойник
30. ЭДС – электродвижущая сила
31. ЭС – электрическая сеть
32. ЭЭС – электроэнергетическая система
33. САЕ – Computer-aided engineering
34. DLL – Dinamic link library
35. VBA – Visual Basic for Application

## **Введение**

### **Актуальность темы диссертации.**

Тенденции развития энергетической отрасли диктуют необходимость расчета, анализа и прогнозирования режимов работы участков электрических сетей (ЭС) в установившихся и переходных симметричных, несимметричных и аварийных режимах. Так как основным оборудованием распределительных сетей являются силовые трансформаторы (СТ), их параметры во многом определяют режимы работы всей сети. *Поэтому актуальной является проблема расчета параметров трансформатора, наиболее приближенных к действительным значениям, при его проектировании и влияния этих параметров на работу сети при его эксплуатации.*

Существенное влияние на работу сети оказывает такой параметр трансформатора, как напряжение короткого замыкания (КЗ), который во многом определяется характером магнитных полей вне магнитопровода. Как показывают исследования, традиционные схемы замещения трансформатора, не учитывающие взаимного влияния полей вне магнитной системы, неточно описывают его работу в переходных несимметричных и аварийных режимах. Наибольшие проблемы возникают при моделировании многообмоточных трансформаторов. Все это отражается на точности моделировании ЭС в наиболее ответственных с точки зрения надежности ее эксплуатации режимах работы. *Поэтому актуальной является также проблема создания имитационных моделей, адекватно описывающих работу трансформатора в различных режимах работы.* Данная проблема находится в русле современных тенденций цифровизации экономики, в частности, направления, связанного с созданием цифровых двойников технических устройств.

### **Степень разработанности проблемы.**

Методики расчета параметров трансформаторов в системах автоматизированного проектирования достигли высокого уровня точности еще в Советском Союзе благодаря работам П.М. Тихомирова, Г.С. Цыкина, Л.В. Лейтеса,

А.И. Лурье, Я.Л. Фишлера, Р.С. Бабиса, П.Л. Калантарова, Ю.Б. Бородулина. Большой вклад в теорию внесли экспериментальные и статистические исследования, выполненные Всесоюзным институтом трансформаторостроения (ВИТ), Всесоюзным электротехническим институтом им. В.И. Ленина (ВЭИ). Значительную исследовательскую работу провели специалисты крупных заводов, таких как «Электрозавод» (г.Москва) (МЭЗ), «Запорожтрансформатор» (г. Харьков), «Минский электротехнический завод им. В.И. Козлова» (г.Минск), ПО «Уралэлектротяжмаш» (г. Екатеринбург). Данная диссертация находится в русле Ивановской школы САПР, представленной в трудах Ю.Б. Бородулина, Ю.Я. Щелыкалова, Ю.Б. Казакова, Г.В. Попова, В.Н. Нуждина, А.Р. Колганова, А.И. Тихонова, В.А. Мартынова.

Точный расчет параметров трансформатора в настоящее время связывают с моделями магнитного поля. Для этих целей используются системы инженерного анализа, такие как ANSYS Maxwell, COMSOL Multiphysics, ElCut. В ИГЭУ была разработана библиотека моделирования магнитных полей методом конечных элементов, способная интегрироваться с системами программирования математических пакетов (Microsoft Excel, MATLAB, MathCAD) и позволяющая программировать процесс создания и анализа полевых моделей.

С учетом достаточно широких возможностей по расчету магнитных полей, которые лежат в основе определения параметров СТ при проектировании, остается слабо проработанным вопрос терминологии в данной сфере: очевиден конфликт между классическим пониманием топологии магнитного поля СТ, описанным в теории электрических машин, и методикой деления поля СТ в соответствии с ГОСТ 16110-70.

**Работа выполнялась** в Ивановском государственном энергетическом университете имени В.И. Ленина.

**Цель работы** заключается в расширении функционала подсистем поверочного расчета в САПР СТ за счет уточненных имитационных моделей, позволяющих уже на стадии проектирования анализировать особенности характерных режимов работы данных устройств в составе электрических сетей.

**Задачи, решаемые в диссертации:**

1. Разработать методику определения параметров КЗ СТ на стадии проектирования с учетом взаимного влияния полей вне магнитной системы.
2. Создать имитационную модель, позволяющую анализировать переходные, в том числе и аварийные режимы СТ, а также учесть взаимное влияние полей вне магнитной системы.
3. Сформулировать методику расчета установившихся симметричных и несимметричных режимов работы участков ЭС, содержащих СТ, с учетом нелинейности характеристик СТ.
4. Разработать подсистему расширенного поверочного расчета в составе САПР СТ, которая может использоваться как при проектировании СТ, так и при исследовании влияния параметров СТ на работу ЭС.
5. Апробировать разработанные модели режимов работы СТ в составе ЭС.

Соответствие паспорту специальности. Работа соответствует паспорту специальности: *в части формулы специальности 05.13.12: «...специальность, занимающаяся проблемами создания и повышения эффективности функционирования систем автоматизированного проектирования, управления качеством проектных работ на основе использования современных методов моделирования и инженерного анализа.... Специальность включает принципы и методы, отличающиеся тем, что они содержат разработку и исследования научных основ проектирования, построения и функционирования интегрированных интерактивных комплексов анализа и синтеза проектных решений...»*. В части области исследования специальности 05.13.12 – пункту 2: «Разработка научных основ создания систем автоматизации проектирования ...»; пункту 3: «Разработка научных основ построения средств САПР, разработка и исследование моделей, алгоритмов и методов для синтеза и анализа проектных решений...».

**Методы исследования.** Используются методы теории САПР, теории силовых трансформаторов, теории цепей, теории магнитного поля, в частности,

метод конечных элементов, методы анализа переходных процессов в нелинейных электрических цепях, в частности, в цепях с трансформаторами, методы расчета и анализа режимов работы электрических сетей.

### **Научная новизна.**

1. Предложена методика расширенного поверочного расчета в САПР силовых трансформаторов, *отличающаяся* использованием уточненных имитационных моделей, позволяющих уже на стадии проектирования анализировать особенности работы проектируемого устройства в установившихся и переходных нормальных и аварийных режимах с учетом параметров электрической сети, в том числе и с учетом возможной несимметрии.

2. Сформулирована методика расчета параметров короткого замыкания силовых трансформаторов при его проектировании на основе результатов моделирования магнитного поля, *отличающаяся* наличием возможности учета взаимного влияния полей обмоток трансформатора вне магнитной системы, *позволяющая* строить уточненные имитационные модели трансформаторов.

3. Разработана имитационная модель силового трансформатора, *отличающаяся* возможностью учета взаимных индуктивностей полей вне магнитной системы, обеспечивающего повышенную точность расчета переходных, в том числе аварийных, режимов работы трансформатора.

4. Создана математическая модель для расчета установившихся симметричных и несимметричных (в том числе и аварийных) режимов работы силовых трансформаторов, *отличающаяся* учетом индуктивностей полей вне магнитной системы и нелинейных параметров магнитной системы трансформатора.

### **Практическая значимость результатов работы.**

1. Используя табличный процессор Microsoft Excel и библиотеку моделирования магнитного поля EMLib, реализован параметрический генератор конечно-элементной модели для расчета полей вне магнитной системы СТ и модуль расчета матрицы индуктивностей, основанный на полевых расчетах, в составе САПР СТ.

2. С применением табличного процессора Microsoft Excel и пакета MATLAB разработан модуль расчета матрицы индуктивностей, использующий аналитическую модель обмоток трансформатора.

3. На основе Microsoft Excel и MATLAB Simulink создана имитационная модель СТ с учетом взаимного влияния полей вне магнитной системы, которая может быть интегрирована в модель произвольных ЭС.

4. С помощью Microsoft Excel и MATLAB реализована подсистема расчета установившихся симметричных, несимметричных и аварийных режимов работы СТ, интегрированная в САПР СТ, позволяющая снизить затраты на проведение натурных испытаний СТ и тем самым повысить эффективность проектирования.

5. С использованием табличного процессора Microsoft Excel создан модуль имитационного моделирования СТ, используя который развита подсистема расширенного расчета параметров короткого замыкания в составе подсистемы поверочного расчета САПР СТ.

6. Осуществлен расчет параметров короткого замыкания нескольких трансформаторов, производимых на ООО «Трансформер» (г. Подольск) и ООО «НПК «АВТОПРИБОР» (г. Владимир).

**Достоверность и обоснованность полученных результатов** подтверждается использованием теории силовых трансформаторов и магнитных цепей, методов анализа переходных процессов, а также апробированных методов математического моделирования, сравнением результатов расчета с результатами приемо-сдаточных испытаний трансформаторов, полученных на заводах ООО «Трансформер» (г. Подольск) и ООО «НПК «АВТОПРИБОР» (г. Владимир).

**Реализация результатов работы.** Результаты работы внедрены в производственный процесс в ООО «Трансформер» (г. Подольск) и ООО «НПК «АВТОПРИБОР» (г. Владимир), а также в учебный процесс на кафедре ТОЭЭ ИГЭУ (г. Иваново).

Реализация результатов работы подтверждена актами внедрения.

Автор защищает:

- положения научной новизны;
- методику исследования влияния параметров силового трансформатора на работу электрической сети в установившихся и переходных симметричных, несимметричных и аварийных режимах;
- результаты апробации разработанных моделей и методик.

**Личный вклад автора** состоит в разработке методики расчета параметров короткого замыкания СТ на этапе его проектирования, учитывающей взаимное влияние полей вне магнитной системы; имитационной модели СТ с учетом матрицы индуктивностей обмоток; модели установившихся симметричных, несимметричных и аварийных режимов работы СТ в составе ЭС; методики исследования влияния параметров трансформатора на работу электрической сети в переходных симметричных, несимметричных и аварийных режимах; в разработке структуры подсистемы уточненного расчета параметров короткого замыкания в составе подсистемы поверочного расчета САПР СТ; в участии в разработке и отладке программного обеспечения подсистемы поверочного расчета САПР СТ, в частности, параметрического генератора модели полей вне магнитопровода СТ, подсистемы расчета матрицы индуктивностей, в том числе с использованием аналитической модели полей вне магнитной системы; в проведении численных исследований на предмет корректности допущений, принятых в полевых моделях; в проведении экспериментальных исследований на основе экспериментов на реальных трансформаторах в целях апробации разработанных моделей.

**Апробация работы.** Результаты работы докладывались на конференциях: на XIII, XIV, XV и XVI научно-технической конференции студентов и аспирантов «Энергия» (г. Иваново, ИГЭУ, 2018, 2019, 2020, 2021 гг.); «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов, г. Москва, МЭИ, 2018 г.); «Современное состояние, проблемы и перспективы энергетики и технологии в энергостроении» (Международная научно-техническая конференция XX и XXI

Бенардосовские чтения, г. Иваново, ИГЭУ, 2019, 2021 гг.); «Проблемы и перспективы развития электроэнергетики и электротехники» (Всероссийская научно-практическая конференция, г. Иваново, КГЭУ, 2019 г.); «Надежность и долговечность машин и механизмов» (Всероссийская научно-практическая конференция, г. Иваново, ИПСА ГПС МЧС, 2020 г.); 2020 International Ural conference on electrical power engineering, Uralcon 2020 (г. Челябинск, 2020 г.).

**Публикации.** По результатам работы опубликованы 4 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК, 8 статей в периодических изданиях, сборниках статей и материалов конференций, 5 тезисов докладов, 2 методические указания, 1 заявка на свидетельство на программный продукт.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 123 наименования, и приложения. Основная часть работы изложена на 129 страницах и содержит 51 иллюстрацию.

# **1. Современное состояние проблемы расчета режимов работы объекта проектирования в САПР силовых трансформаторов**

## **1.1. Современное состояние САПР силовых трансформаторов**

В основе современного автоматизированного проектирования технических устройств лежит системный подход, который предполагает рассмотрение частей устройства с учетом их взаимодействия. САПР, построенные с использованием системного подхода, обладают следующими особенностями: структуризация процесса проектирования, итерационный характер проектирования, типизация и унификация проектных процедур [71, 24].

Реализация системного подхода приводит к тому, что современные САПР, как правило, строятся на модульном принципе [35]. То есть при создании САПР сначала осуществляется разработка и отладка отдельных подсистем (модулей), дополняющих и/или продолжающих друг друга, а затем данные модули интегрируются в единую систему, отвечающую заданным требованиям [3]. Это существенно облегчает дальнейшее расширение функционала САПР.

Различные аспекты проектирования с использованием САПР обеспечиваются применением следующих подсистем [58, 114]:

1. CAE (Computer Aided Engineering) – подсистема расчетов и инженерного анализа, осуществляющая моделирование, оптимизацию и поверочный расчет изделий [2, 34]. Данные подсистемы строятся, как правило, на основе моделей физических полей, которые иногда дополняются цепными моделями. К числу наиболее популярных в России CAE-систем, используемых при проектировании трансформаторов можно отнести ANSYS Maxwell, COMSOL Multiphysics, ELCUT и др. [76, 59].

2. CAD (Computer Aided Design) – подсистема конструкторского проектирования, предназначенные для автоматизации двух- и трехмерного геометрического проектирования. К числу наиболее популярных в России CAD-

систем, используемых при проектировании трансформаторов можно отнести AutoCAD, SolidWorks, КОМПАС и др. [58].

3. CAM (Computer Aided Manufacturing) – средства технологической подготовки производства изделия, обеспечивающие автоматизацию программирования и управления оборудования. К числу наиболее популярных в России САМ-систем, можно отнести PowerMill, MasterCam, SprutCAM, CAMWorks и др. [58].

4. PDM (Product Data Management) – система управления проектными решениями, координирующая работу систем САЕ/CAD/CAM.

Каждая из этих подсистем создается в виде автономного пакета и обладает всеми свойствами системы, построенной в форме иерархической структуры подсистем, реализующих конкретные проектные операции [114].

Все подсистемы САПР можно условно разделить на функциональные подсистемы, непосредственно выполняющие проектные процедуры, и обеспечивающие подсистемы, которые предоставляют необходимые ресурсы для работы функциональных подсистем [50].

Данная диссертация посвящена разработке функциональных подсистем САПР силовых трансформаторов (СТ), относящихся к разряду САЕ. При разработке этих подсистем можно создавать новый программный продукт с возможностью компиляции с другими, уже существующими САПР. Этот путь не является целесообразным ввиду возникающих трудностей: сложность объединения продуктов, построенных на разных платформах с использованием различного программного обеспечения (ПО); необходимость обеспечения простоты интерфейса полученного продукта, для любого уровня подготовки проектировщика и др.

Другим путем развития является использование готовых программных пакетов, на основе которых могут создаваться элементы САПР, дополняющие уже существующие системы. В рассматриваемой диссертационной работе в качестве основы для интеграции отдельных модулей САПР использован табличный процессор Microsoft Excel, имеющий встроенную среду

программирования на языке Visual Basic for Application. Для реализации наукоемких инженерных процедур использован математический процессор MATLAB, обменивающийся данными с Microsoft Excel посредством интерфейсного модуля SpreadsheetLink. Кроме того, используя технологию DLL, в пользовательские подпрограммы VBA могут быть внедрены сторонние библиотеки [120].

В ряде организаций на территории нашей страны и стран ближнего зарубежья разрабатываются и модернизируются САПР для расчета и проектирования СТ [81, 7]. В частности, в рассматриваемой области САПР широко известны такие разработки, как SAPR-TON (разработка ПАО «ВИТ», г. Запорожье, Украина), в состав которой входят пакеты прикладных программ моделирования электромагнитных, электростатических, тепловых и механических полей и процессов в трансформаторах, реализующих нормативно-техническую базу проектирования трансформаторов [82, 96, 98]. Известна также и разработка Минского электротехнического завода имени В.П. Козлова – система САПР-ПРОТОН, которая предназначена для автоматизации расчетного проектирования силовых трансформаторов напряжением до 35 кВ. Данные системы опираются на общую нормативно-техническую базу, которой являются руководящие документы (РД), разработанные в ВИТ.

Кроме описанных систем расчета и проектирования разработано большое количество программных продуктов, ограниченных по функционалу и мало пригодных для «широкого» использования в силу своей узконаправленности [81, 82]. Их основной недостаток – разработка «под конкретное производство», то есть в их основе лежат не РД с большим количеством номинальных коэффициентов, учитывающих множество влияющих факторов, а некие эмпирические и полуэмпирические коэффициенты, полученные опытным путем на конкретном производстве и пригодные к использованию только на этом производстве. В целом, получается ситуация, когда организации, занимающиеся проектированием схожих по параметрам СТ, не могут обмениваться опытом и

наработанной базой. Отсюда же вытекает проблема стандартизации разрабатываемой продукции [110].

Подобную ситуацию можно наблюдать не только в организациях, располагающихся на территории постсоветского пространства, но и в других странах ближнего и дальнего зарубежья. Поэтому использование иностранного оборудования и иностранного ПО зачастую не решает проблему, а только усугубляет ее, поскольку в данном случае приходится прибегать к услугам иностранных специалистов, что негативно сказывается на рынке труда в РФ.

Ввиду конкуренции на рынке трансформаторов названные выше продукты практически недоступны для широкого пользователя, в частности, для многочисленных предприятий трансформаторостроения из сферы малого и среднего бизнеса [110, 59].

В связи с этим актуальной является задача разработки САПР СТ, доступной широкому кругу проектных организаций предприятий, специализирующихся на производстве трансформаторов. При разработке таких САПР стоит использовать стандартные пакеты ПО, так как это избавит от необходимости разработки графического интерфейса системы, относящей к разряду наиболее трудоемких операций, а также обеспечит разработчика САПР мощным аппаратом численной математики [118].

Одной из главных задач, возникающих при создании подобных модульных САПР, является задача разработки уточненных математических моделей, которые могут быть использованы в подсистемах поверочного расчета.

В связи с мировой тенденцией цифровизации энергетики возрастают требования не только к точности, но и к быстродействию имитационных моделей, получающих статус «цифрового двойника» (ЦД) [27]. Это требует повышать точность расчета параметров проектируемого объекта. На характеристики ЦД всей энергосистемы влияют характеристики ЦД каждого объекта системы.

Поэтому особый акцент в данной диссертации делается на разработку модулей подсистемы поверочного расчета САПР СТ, определяющих влияние

проектируемого объекта на работу энергосистемы, и на разработку имитационной модели СТ, которая может быть интегрирована в ЦД энергосети.

## **1.2. Влияние параметров трансформаторного оборудования на его режимы работы в составе электрических сетей**

Проблема анализа режимов работы участков электрических сетей (ЭС) является актуальной уже не одно десятилетие. Решением этой проблемы занималось большое количество советских и российских ученых и инженеров-энергетиков, среди которых В.А. Веников, С.А. Ульянов, С.С. Рокотян, В.И. Идельчик, Г.Е. Пospelов и др. При их участии были разработаны математические методы и модели по расчету и оптимизации статических режимов ЭС. В основу этих методов положены основы теории электрических цепей, а также теории графов и матричных методов расчета [41, 16].

С конца прошлого века массовое развитие получили программные комплексы для расчета режимов работы ЭС. В настоящее время возрастают требования к точности расчетов. В соответствии с «дорожной картой развития» [69] планируется внедрение технологии «цифровой двойник», предполагающей использование семейства сложных мультидисциплинарных математических моделей с высоким уровнем адекватности реальным объектам.

Преимуществом применения данной технологии в первую очередь может являться снижение временных, финансовых и иных затрат до 10 раз, как на стадии проектирования (при использовании в составе САПР), так и на стадии эксплуатации сетей. Это связано с возможностью заранее рассмотреть наиболее вероятные и наиболее тяжелые режимы эксплуатации оборудования с использованием точных имитационных моделей, а не на натурных испытаниях (к примеру, испытание СТ на электродинамические усилия в обмотках при протекании токов КЗ предполагает вывод СТ из строя) [46, 47].

Все математические модели, так или иначе, базируются на схемах замещения объектов электроэнергетики, то есть на их расчетных моделях. Способ представления элемента определяется его физической сущностью, режимом

работы, настройкой его систем регулирования, конструктивными особенностями, схемой включения и т.п. [53, 14]. В соответствии с ГОСТ Р 57412-2017 [26] модели, учитывающие динамическое изменение одних параметров модели от других, принято называть имитационными. В частности, здесь говорится, что «имитационная модель отражает элементарные явления, составляющие процесс, с сохранением их логической структуры и последовательности протекания во времени, что позволяет по исходным данным получить сведения о состояниях процесса в определенные моменты времени, дающие возможность оценить свойства объекта моделирования» [26]. В [121] также отмечается: «имитационная модель – это компьютерная программа, которая описывает структуру и воспроизводит поведение реальной системы во времени. Имитационная модель позволяет получать подробную статистику о различных аспектах функционирования системы в зависимости от входных данных». Имитационное моделирование в своей основе имеет точные математические модели отдельных элементов, предполагающие наиболее полный учет всех факторов, оказывающих влияние на режим работы устройства. Расхождение имитационных моделей с реальными объектами в части испытаний не должно превышать 5% [69].

Наибольший интерес и сложность при создании ЦД представляет учет параметров силовых трансформаторов и автотрансформаторов, поскольку схемы замещения этих элементов, отражающие реальные процессы в них, достаточно сложны и определяются структурой обмоток СТ, геометрией магнитной системы, регулировочными характеристиками и многими другими факторами [56, 13, 42], в том числе и нелинейным характером некоторых элементов. Особенно это актуально в несимметричных режимах работы.

Попытка учета абсолютно всех факторов, влияющих на параметры оборудования, приведет к неприемлемому усложнению математических моделей. Поэтому, как отмечено в [118], круг рассматриваемых процессов ограничивают в соответствии с задачей. В [56] сформулированы основные проблемы, возникающие при моделировании трансформаторов и допущения,

принимаемые при составлении схем замещения, которые можно применять для большинства рассматриваемых задач.

В базовом курсе дисциплины «Электрические машины», который рассмотрен в [19, 45, 39], приведена T-образная схема замещения СТ, построенная на базовых физических принципах работы СТ (рис. 1.1) и описываемая следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \underline{Z}_{\sigma 1} \dot{I}_1; \\ \dot{U}'_2 = \dot{E}'_2 - \underline{Z}'_{\sigma 2} \dot{I}'_2; \\ \dot{I}_1 + \dot{I}'_2 = \dot{I}_0; \\ \dot{E}_1 = -\underline{Z}_M \dot{I}_0. \end{cases} \quad (1.1)$$

Здесь

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{\sigma 1} &= r_1 + jx_{\sigma 1}, \\ \underline{Z}'_{\sigma 2} &= r'_2 + jx'_{\sigma 2}, \\ \underline{Z}_M &= r_M + jx_M, \end{aligned} \quad (1.2)$$

где  $\underline{Z}_{\sigma 1}$  – комплексное сопротивление первичной обмотки,  $\underline{Z}'_{\sigma 1}$  – приведенное комплексное сопротивление вторичной обмотки,  $\underline{Z}_M$  – комплексное сопротивление ветви намагничивания.

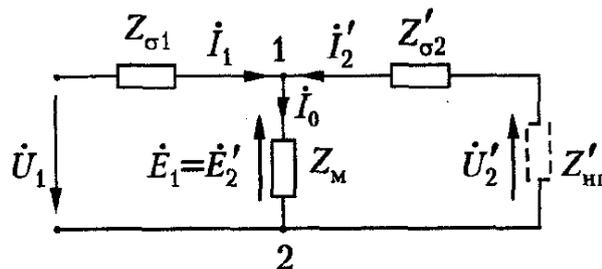


Рис. 1.1. T-образная схема замещения силового трансформатора

В данной схеме элементы, каждый из которых имеет физический смысл, имеют только электрические связи. Магнитные связи обмоток отражаются введением намагничивающей ветви  $\underline{Z}_M$ .

Особенностью данной схемы и построенной на ней математической модели является приведение параметров вторичной обмотки к первичной путем замены реальной вторичной обмотки виртуальной, имеющей такое же число витков, что и первичная. Коэффициент приведения [19, 45, 39]

$$k = \frac{\Psi_1}{\Psi_2} = \frac{w_1}{w_2}, \quad (1.3)$$

где  $w_1, w_2$  – число витков первичной и вторичной обмоток соответственно.

В случае, когда СТ оборудован устройствами РПН и/или ПБВ [94], коэффициент приведения может меняться в процессе работы и принимает вид

$$k = \frac{U_{н1} \left( 1 \pm \frac{\Delta k_{\%} n}{100} \right)}{U_{н2}}, \quad (1.4)$$

где  $U_{н1}, U_{н2}$  – номинальные напряжения обмоток трансформатора;  $\Delta k_{\%}$  – ступень регулирования первичной обмотки (с РПН или ПБВ);  $n$  – номер ответвления регулировочной обмотки.

При расчете установившихся режимов (УР) большую роль играет верное определение сопротивлений трансформаторов с точки зрения приведения к нужной стороне трансформации [53]. Избежать приведения обмоток СТ можно при расчете УР в системе относительных единиц. В настоящее время при расчетах УР на ПК допустимо применять схему замещения СТ с приведением сопротивлений к любым ступеням напряжения.

Как правило, магнитное сопротивление  $Z_M$  значительно больше приведенных сопротивлений обмоток [19, 45, 39]. Поэтому зачастую применяют упрощенную схему замещения СТ (рис. 1.2), где

$$\begin{aligned} R_T &= R_1 + R'_2, \\ X_T &= X_{\sigma 1} + X'_{\sigma 2}. \end{aligned} \quad (1.5)$$

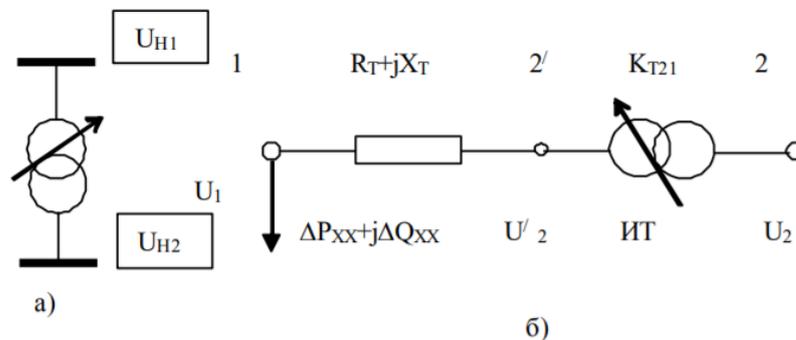


Рис. 1.2. Схема замещения силовых трансформаторов, используемая при расчетах УР

Потери холостого хода (потери в ветви намагничивания) учитываются паспортными величинами  $\Delta P_{xx}$  и  $\Delta Q_{xx}$ , которые определяются на этапе

проектирования и уточняются при испытаниях. Учет СТ подобным образом не соответствует представлению о точных имитационных моделях и не удовлетворяет требованиям концепции ЦД.

В [28] с использованием обобщенной X-образной схемы замещения идеального однофазного двухобмоточного трансформатора (рис.1.3) строится математическая модель ЭЭС в фазных координатах. В данной схеме также не учтена ветвь намагничивания, однако при пересчете режимных параметров ЭЭС учитывается точный коэффициент трансформации СТ. Причем при использовании данной методики также невозможно избежать приведения параметров СТ к одному уровню напряжения.

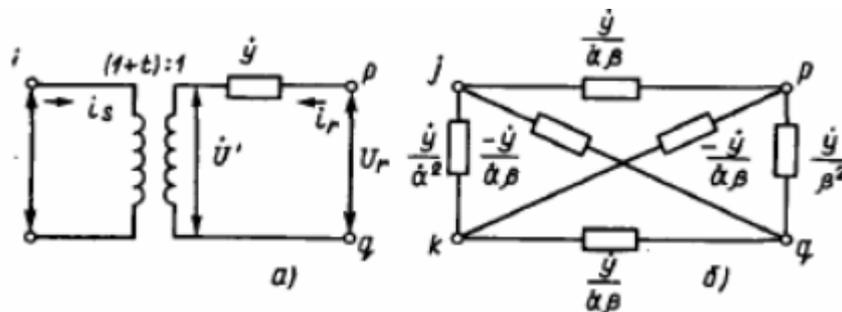


Рис. 1.3. Схема замещения идеального однофазного трансформатора (а) и обобщенная X-образная схема замещения идеального однофазного трансформатора (б)

Более точный учет параметров СТ путем использования схем замещения, отражающих реальную физическую картину работы СТ, влечет за собой увеличение количества узлов и ветвей в схеме замещения СТ, что приведет к увеличению длительности поверочных расчетов и проектирования в целом, а также усложнению схемы замещения и увеличению времени расчета режимов работы реальной ЭС, содержащей СТ.

Анализ несимметричных режимов работы в настоящее время осуществляется с использованием метода симметричных составляющих [15, 57, 62, 63], который предполагает отдельное рассмотрение схем замещения для токов прямой, обратной и нулевой последовательностей. Расчеты при этом усложняются в разы. В [28] предлагается методика расчета квазиустановившихся режимов многомашинной ЭЭС, а также режимов КЗ в фазных координатах.

Данная методика также содержит в себе достаточно большое количество допущений и требует большого количества дополнительных расчетов параметров элементов схемы замещения ЭЭС. Соответственно, требуются гораздо большие вычислительные мощности и время для расчета.

В связи с этим актуальным является создание имитационной модели, которая может быть использована как на стадии проектирования трансформаторов, так и на стадии их эксплуатации, позволяющей рассчитывать режимы работы СТ совместно с электрической сетью, учитывая при этом особенности конструкции СТ, в том числе параметры ХХ и КЗ.

### **1.3. Современное состояние проблемы имитационного моделирования силовых трансформаторов**

#### **1.3.1. Модели для расчета параметров короткого замыкания СТ с учетом полей вне магнитной системы**

К эксплуатационным электромагнитным характеристикам СТ, которые указываются заводом-изготовителем, относятся [57, 6]:

- 1) напряжение короткого замыкания;
- 2) потери короткого замыкания;
- 3) ток холостого хода;
- 4) потери холостого хода.

При определении этих параметров учитывают, что поле на холостом ходу (ХХ) практически не отличается от основного поля, а поле при КЗ – от поля вне магнитной системы [57]. Остальные режимы работы СТ можно рассматривать как разные стадии «перехода» от режима ХХ к режиму КЗ. Следовательно, параметры этих двух режимов будут оказывать влияние на все режимы работы СТ.

Определение параметров ХХ и учет их при создании точных математических моделей описан в [57, 56]. При определении параметров ХХ СТ на стадии проектирования зачастую опираются на работы [98, 56]. Проблема

уточненного определения параметров ХХ и построения математических моделей на этих величинах освещена в [103, 108]. Поэтому в данной диссертации проблематика расчета параметров ХХ не затрагивается. Разработанные модели будут дополняться параметрами КЗ.

Под параметрами КЗ СТ понимают напряжение, потери, активное и реактивное сопротивление КЗ. Эти параметры определяются при протекании по обмоткам номинальных токов при короткозамкнутой вторичной обмотке.

Потери КЗ условно разделяют на основные потери в обмотках и отводах и дополнительные потери, вызванные вихревыми токами в обмотках, отводах и элементах конструкции [98]. Стоит отметить, что в настоящее время сетевыми организациями предъявляются довольно жесткие требования к уровню потерь ХХ и КЗ [95]. Данные требования необходимо учитывать при проектировании СТ.

Параметры КЗ определяются, главным образом, полями вне магнитной системы. То есть их расчет сводится к расчету поля вне магнитной системы СТ. Понятие поля рассеяния введено стандартом [23]. Также оно описывается в [18, 116]. Причем между двумя этими понятиями очевидна разница: в [18] оно вводится при рассмотрении катушек, имеющих общий магнитопровод, и протекании тока только в одной из них, а в [23] при тех же конструктивных условиях оговаривается имитация опыта КЗ: равенство МДС обмоток при их встречном направлении. В [39] упомянуто допущение о раздельном рассмотрении таких составных частей магнитного поля, как поле рассеяния и поле взаимной индукции, т.е. эти понятия взаимоисключают друг друга. Во избежание путаницы в терминологии, используемой в различной литературе, часть магнитного поля в опыте КЗ, отличную от основного поля, будем именовать полем вне магнитной системы СТ. Причем поле вне магнитной системы будет в себя включать и составляющую, учитывающую взаимное влияние обмоток, но отличную от основного потока.

В [1] приведен обзор литературы и основные методики по расчету параметров КЗ, а именно индуктивностей обмоток СТ, актуальные в прошлом веке.

Для большинства задач электроэнергетики эти методы актуальны и по сей день, поскольку они отработаны годами и дают неплохие результаты.

Все схемы замещения, лежащие в основе математических моделей СТ, содержат в себе индуктивные сопротивления, называемые в настоящее время сопротивлениями рассеяния (рис. 1.1). Именно они в основном определяют напряжение КЗ.

В [98] приводится формула для определения реактивной составляющей напряжения КЗ, которая является преобладающей в напряжении КЗ

$$u_p = \frac{x_k I_{\text{НОМ}}}{U_{\text{НОМ}}} 100. \quad (1.6)$$

В [56] приводится формула

$$u_p = \frac{Q_k}{S_{\text{НОМ}}} 100. \quad (1.7)$$

В обоих случаях здесь присутствует влияние полей вне магнитопровода.

При проектировании СТ напряжение КЗ должно совпадать со значением, заданным в ТЗ на проект трансформатора [8]. ГОСТ 11677-85 устанавливает, что напряжение КЗ на основном ответвлении не должно отличаться от гарантийного значения более чем на  $\pm 10\%$ . Для того, чтобы у готового СТ значение напряжения КЗ оставалось в пределах, регламентированных ГОСТ, рекомендуется при расчете СТ не допускать отклонений в расчетном значении  $u_k$  более чем  $\pm 5\%$  гарантийного значения, так как при изготовлении СТ возможны отклонения в размерах обмоток, что еще добавляет  $\pm 5\%$  [32].

Как правило, в современных САПР используются инженерные методики, описанные в РД и в литературе по проектированию трансформаторов [98, 57]. Все они едины в методологии, основанной на представлении СТ упрощенными схемами замещения.

На этапе проектирования реактивное сопротивление определяется по приближенной формуле, в которую входят эмпирические коэффициенты. Для случая взаимного расположения концентрических обмоток, показанного на рис. 1.3 [98], при неравной высоте обмоток и равномерном распределении

витков по их высоте, реактивное сопротивление трансформатора может быть представлено как

$$x_k = \frac{7,9f\omega^2 \pi d_{12}}{l} a_p k_p k_q 10^{-6}, \quad (1.8)$$

где  $d_{12}$  – средний диаметр канала между обмотками, м;  $\omega$  – число витков;  $l$  – средняя высота обмоток, м;  $a_p$  – ширина приведенного канала рассеяния, м.

Для трансформаторов мощностью до 10000 кВА ширину приведенного канала рассеяния определяют по приближенной формуле:

$$a_p \approx a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3}. \quad (1.9)$$

Выражение (1.8) предполагает, что все линии индукции магнитного поля вне магнитопровода в пределах высоты обмотки прямые, параллельные оси обмотки с поправкой на отклонение вблизи торцов обмотки, что учитывается коэффициентом  $k_p$ . Он может быть подсчитан по приближенной формуле

$$k_p \approx 1 - \sigma(1 - e^{-1/\sigma}) \approx 1 - \sigma, \quad (1.10)$$

где  $\sigma = \frac{a_{12} + a_1 + a_2}{\pi l}$ .

Неравенство высот обмоток учитывается коэффициентом

$$k_q \approx 1 + \frac{l_x^2}{m a_p k_p}, \quad (1.11)$$

где  $x = l_x/l$  – отношение, характеризующее разницу высот обмоток (рис. 1.4);  $m=3$  для рис.1.4, а и 1.4, в и  $m=0,75$  для рис.1.4, б.

Сопротивление КЗ приведенного трансформатора

$$x_k = x_1 + x_2' = x_1 + x_2 k_T^2 \quad (1.12)$$

где  $k_T$  – коэффициент трансформации.

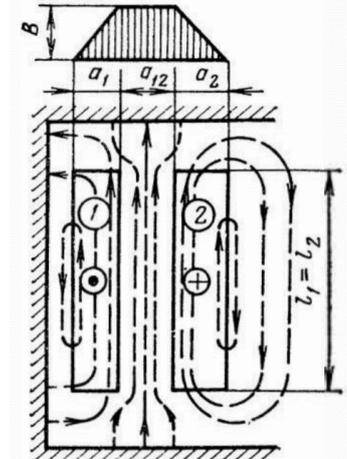


Рис. 1.3. Поле рассеяния двух concentрических обмоток

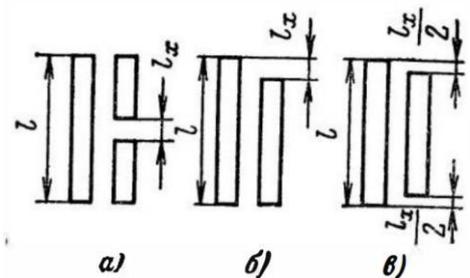


Рис. 1.4. Различные случаи взаимного расположения обмоток трансформатора

Соотношение между сопротивлениями обмоток ВН и НН приблизительно пропорционально соотношению между геометрическими размерами этих

$$\frac{D_{\text{cp1}}/l_1}{D_{\text{cp2}}/l_2} = \frac{x_1}{x'_2} \quad (1.13)$$

Используя соотношение (1.13) и геометрические размеры обмоток трансформатора, можно определить сопротивления обмоток.

Основной недостаток методики – использование эмпирических коэффициентов, которые корректируются для каждого конкретного производства.

Знание картины магнитного поля катушек с током позволяет использовать другую методику определения индуктивностей рассеяния СТ [5].

Магнитный поток  $\Phi$  сквозь поверхность  $S$  в направлении ее положительной нормали определяется как

$$\Phi = \int_S \vec{B} d\vec{S} \quad (1.14)$$

Потокоцепление катушки со сложным сечением

$$\psi = \frac{1}{i} \int \Phi di \quad , \quad (1.15)$$

Где  $di$  – ток какого-либо элементарного трубчатого элемента малого сечения,  $\Phi$  – сцепляющийся с ней магнитный поток.

Поток контура обусловлен как током в этом контуре, так и токами в других контурах. В соответствии с этим различают потоки само- и взаимной индукции [44]. Отношение потока самоиндукции контура к току в нем есть собственная индуктивность  $L$ , а отношение потока взаимной индукции к силе обуславливающего его тока в другом контуре – взаимная индуктивность  $M$ .

Каждый из токов можно разбить на элементарные нити, тогда поток одной из нитей ( $di'$ ) определится как

$$\Phi = \int \bar{M} di'' \quad , \quad (1.16)$$

где  $M$  – взаимная индуктивность нитей  $di'$  и  $di''$ .

Подставляя данное выражение в (1.15), можно получить

$$L = \frac{1}{i^2} \int_i di' \int_i \bar{M} di'' , \quad (1.17)$$

$$M = \frac{1}{i_1 i_2} \int_{i_1} di' \int_{i_2} \bar{M} di'' , \quad (1.18)$$

$$\bar{M} = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_{i'} \oint_{i''} \frac{dl' dl''}{D} \cos \vartheta . \quad (1.19)$$

где  $dl'$  и  $dl''$  – элементы длины нитей, причем нити  $l'$  и  $l''$  принадлежат одному и тому же контуру в (1.17) и двум различным контурам в (1.18);  $D$  – расстояние между этими элементами;  $\vartheta$  – угол между ними.

Приведенные формулы применимы лишь при постоянном токе или при переменном токе низкой частоты, так как они имеют смысл только при условии равенства фазы плотности переменного тока во всех точках контуров.

Для случая низкой частоты, полагая  $di/i = ds/s$ , где  $ds$  – элемент площади поперечного сечения соответствующего провода, формулы примут вид:

$$L = \frac{1}{s^2} \int_s ds' \int_s \bar{M} ds'' , \quad (1.20)$$

$$M = \frac{1}{s_1 s_2} \int_{s_1} ds' \int_{s_2} \bar{M} ds'' . \quad (1.21)$$

Приведенные общие формулы являются основными при расчете индуктивностей. Для интегрирования требуется установить картину магнитного поля и координаты витков, а также приходится прибегать к ряду допущений, основанных на пренебрежении некоторыми размерами.

Также применяются такие методы, как метод среднегеометрических расстояний (СГР), метод плотности энергии магнитного поля, метод мощностей [44]. Эффективной оказывается комбинация нескольких методов [4].

При использовании метода СГР [56] принимается допущение о малой кривизне обмоток. Используя теорему для четырех прямоугольников, индуктивность определяется как

$$L = \frac{\mu_0 w^2 l}{2\pi} \left[ \frac{1}{2} \left( \varepsilon \ln \frac{\alpha\beta}{\gamma\delta} + \frac{d}{a} \ln \frac{\alpha\gamma}{\beta\delta} + \frac{d}{c} \ln \frac{\alpha\delta}{\beta\gamma} \right) + \ln \frac{\sqrt{\Pi}}{(h+2a)(h+2c)} \right], \quad (1.22)$$

где  $\alpha=h+d+a+c$ ;  $\beta=h+d-a-c$ ;  $\gamma=h+d+a-c$ ;  $\delta=h+d-a+c$ ;  
 $\varepsilon=(a^2+c^2+d^2)/2ac$ ;  $\Pi = \alpha\beta\gamma\delta$ ;  $2a, 2c$  – толщина обмоток  
 1 и 3;  $h$  – высота обмоток;  $d$  – расстояние между сре-  
 динами сечений;  $l$  – средняя длина витка (рис. 1.5).

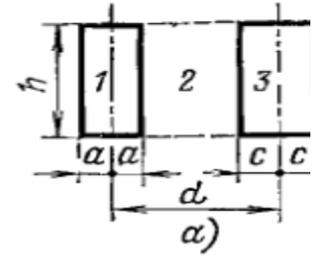


Рис. 1.5. К расчету индуктивности рассеяния по методу СГР

Расчет поля СТ вне магнитной системы с учетом геометрии витков, катушек, особенностей их расположения, с учетом элементов конструкции и бака СТ оказывается задачей сложной с точки зрения математического описания [40]. В этом случае прибегают к упрощенному описанию, что сказывается на точности определения параметров КЗ. В этом состоит главный недостаток описанных методов.

Поэтому в настоящее время активно развиваются методы расчета, основанные на создании точных полевых моделей с использованием САЕ-систем, таких как ANSYS, ELCUT, COMSOL Multiphysics [75, 77, 83, 51]. В решении этих задач по-прежнему лежат основы теории электромагнитного поля [112], но используются они с учетом особенностей рассматриваемого оборудования и поставленных задач. Здесь можно отметить работы по использованию 2D-моделей магнитного поля в расчетах СТ, например, [110].

В [101] описана методика расчета индуктивностей с использованием осесимметричной конечно-элементной модели магнитного поля с учетом вытеснения тока на примере реактора с фольговыми обмотками. Для определения взаимных индуктивностей обмоток используются результаты сплайновой аппроксимации серии расчетов магнитного поля элементарных кольцевых соосных контуров с током, собранные в матрицу

$$L_{ij}(D_i, D_j, X_{ij}), \quad (1.23)$$

где  $L_{ij}$  – взаимная индуктивность двух элементарных кольцевых контуров –  $i$ -го кольца диаметром  $D_i$  и  $j$ -го кольца диаметром  $D_j$ ;  $X_{ij}$  – расстояние между центрами элементарных кольцевых контуров.

При этом взаимная индуктивность контура  $ks$  с  $q$ -м контурным током определится как сумма взаимных индуктивностей  $ks$ -го элементарного контура с элементарными контурами, по которым течет  $q$ -й контурный ток,

$$L_{ks,q} = \frac{\partial \Psi_{ks}}{\partial i_q} = \sum_{r=1}^{N_q} K_r \frac{d\Psi_{ks}}{di_r} = \sum_{r=1}^{N_q} K_r L(D_{ks}, D_r, X), \quad (1.24)$$

Однако данный подход не позволяет определить взаимные индуктивности несоосных катушек.

В [68] описана методика определения индуктивностей обмоток по полям вне магнитной системы по экспериментальным кривым переходного тока. Этот способ применим только в случае наличия опытного образца и не работает при проектировании СТ.

Несмотря на многообразие методов расчета индуктивностей обмоток по полям вне магнитной системы СТ отсутствует универсальный метод определения параметров КЗ. При этом для некоторых типов устройств возникает проблема невозможности точного определения индуктивностей. Например, в случае трехобмоточного СТ определяются напряжения КЗ пар обмоток (ВН-НН, ВН-СН, СН-НН), а затем по эмпирическим формулам пересчитываются в соответствующие им индуктивные сопротивления [98]. Такая методика не отражает реальной картины, поскольку некоторые сопротивления при этом оказываются меньше нуля. Поэтому в справочной литературе индуктивное сопротивление обмотки СН трехобмоточных трансформаторов принимается равным нулю [94].

Таким образом, актуальной темой для исследований является разработка универсальной методики и математических моделей для определения собственных и взаимных индуктивностей обмоток СТ по полям вне магнитопровода, отвечающих современным требованиям и способных интегрироваться с другими моделями.

### 1.3.2. Модели для имитации режимов работы силовых трансформаторов

Не менее важной является задача по расчету режимов работы СТ. Наряду с номинальным режимом работы интерес представляют:

1. Аварийные режимы (в частности режимы КЗ), способные вывести из строя оборудование или изменить его параметры.

2. Несимметричные режимы работы, обуславливаемые невозможностью выровнять нагрузку по фазам, а также неполнофазными режимами работы и отсутствием транспозиции ЛЭП [41].

3. Переходные режимы.

Простейшие модели, описывающие работу СТ в различных режимах и построенные на допущениях о линейности параметров СТ, описаны в [19, 55, 41, 14]. Но в [70] указывается на недопустимость таких допущений.

Моделированию электротехнических устройств с учетом нелинейности параметров посвящено множество трудов, среди них [64, 49], в том числе в статических [104, 60] и переходных [46, 60, 79] режимах.

Математическая модель СТ строится, как правило, на основе системы дифференциальных уравнений вида [18]

$$\left\{ \begin{array}{l} u_1 = -e_1 + L_{\sigma 1} \frac{di_1}{dt} + r_1 i_1; \\ u_2 = e_2 - L_{\sigma 2} \frac{di_2}{dt} - r_2 i_2; \\ e_1 = -\omega_1 \frac{d\Phi_c(t)}{dt}; \\ e_2 = -\omega_2 \frac{d\Phi_c(t)}{dt}; \\ \Phi_c(t) = \lambda_{\mu c} F_0(t); \\ F_0(t) = i_1 \omega_1 + i_2 \omega_2. \end{array} \right. \quad (1.25)$$

Из системы (1.25) при питании СТ от источника синусоидального напряжения в стационарных режимах получается система уравнений (1.1).

При анализе переходных режимов целесообразно данную систему привести к матричной форме записи

$$[u] = \frac{d}{dt}[\psi] + [R][i], \quad (1.26)$$

где  $[u]$  – напряжения на ветвях СТ;  $[i]$  – токи ветвей СТ;  $[\psi]$  – потокосцепления ветвей СТ;  $[R]$  – активные сопротивления ветвей СТ.

Используя понятие о потокосцеплении, (1.26) можно записать как

$$[u] = [L] \frac{d}{dt}[i] + [R][i], \quad (1.27)$$

где  $[L]$  – индуктивности СТ.

При записи системы уравнений в виде (1.27) стоит помнить, что кроме ветвей СТ элементами матриц являются и ветви, моделирующие нагрузку.

Также открытым остается вопрос о заполнении матрицы индуктивностей, поскольку в ней подразумеваются именно индуктивности поля вне магнитной системы, причем как собственные, так и взаимные [65].

В [78] показана неэффективность определения индуктивностей по результатам совместного расчета основного поля и поля рассеяния, так как поток поля рассеяния при этом оказывается в зоне погрешности.

В [103] предлагается использование цепной модели для имитации режимов работы однофазного трансформатора. Она также построена на решении дифференциального уравнения (1.27). В [108] аналогичная модель предлагается для расчета трехфазного стержневого трансформатора. В [105] описываются основные принципы построения цепных моделей.

В [37] также доказывается целесообразность использования цепных моделей для достоверного моделирования трансформаторов в переходных режимах. Причем в описанной модели учитывается как поток рассеяния, так и поток нулевой последовательности. Полученная в [37] схема замещения содержит большое количество элементов и является довольно сложной с точки зрения анализа в переходных режимах.

В теории [18, 45] указывается, что трехфазный трансформатор можно получить, объединив три однофазных. При этом не учитывается взаимное влияние обмоток, расположенных на соседних стержнях.

В [108] предложена методика моделирования СТ с использованием магнитных цепей, обеспечивающая высокую точность в режиме ХХ.

Вопрос определения и учета индуктивностей рассеяния по-прежнему представляет научный интерес, поскольку на сегодняшний день ни одна из существующих методик не позволяет обеспечить требуемую точность.

Наряду с требованием точности имитационных моделей СТ актуально требование быстродействия, поскольку зачастую расчет и анализ режимов работы СТ проводится в режиме реального времени для анализа и прогнозирования работы сети в целом. Требуемое быстродействие могут обеспечить цепные модели, в которых учтены особенности конструкции трансформаторов. Данный учет возможен только при использовании полевых моделей.

Для решения поставленной задачи возможно использование существующих пакетов, таких как MATLAB Simulink SimPowerSystems, а также мультифизических пакетов (COMSOL Multiphysics, ANSYS Maxwell).

### **1.3.3. Модели для имитации режимов работы участков сетей**

Режим работы СТ неотделим от режима работы ЭЭС, элементом которой он является, причем данный факт необходимо учитывать уже на стадии проектирования устройства [15].

Установившийся режим ЭС считается определенным, если известны:

- в узлах – активная и реактивная мощности, модуль и фазовый угол напряжения или его вещественная и мнимая составляющие;
- в ветвях – активная и реактивная мощности в начале и конце ветви.

С середины прошлого века активно велись разработки методик расчета режимов работы ЭС в связи с активным развитием энергетической отрасли. Данной тематике посвящено множество трудов советских и зарубежных ученых. Среди них [115, 14, 41, 55, 29] и др.

Установившиеся режимы ЭС принято описывать системами нелинейных алгебраических уравнений двух видов: уравнениями контурных токов (УКТ) и узловых напряжений (УУН). Неизвестными величинами (корнями) этих уравнений являются комплексы контурных токов для УКТ или напряжений узлов сети для УУН. Число УКТ определяется числом независимых контуров ЭС, а число УУН – числом узлов в ней. Причем УУН получил более широкое распространение при разработке программ для расчетов УР по целому ряду причин [53].

В [67] для расчета режимов работы электрических сетей предложено использовать теорию графов и матричные методы расчета, что значительно упрощают расчеты и уменьшают количество рассматриваемых уравнений.

При расчетах УР могут быть выделены два этапа. Первый заключается в анализе схемных взаимосвязей сети и завершается составлением математических уравнений. Второй этап заключается в решении полученных уравнений [20].

Система УУН формируется по первому закону Кирхгофа для всех узлов ЭС. Искомыми неизвестными здесь являются напряжения узлов, а известными – токи узлов. Коэффициенты уравнений при неизвестных называются узловыми проводимостями. В матричном виде УУН записываются в виде

$$\dot{Y}\dot{U} = \dot{J} , \quad (1.28)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{Y}_{1,1} & \dot{Y}_{1,2} & \dots & \dot{Y}_{1,n} \\ \dot{Y}_{2,1} & \dot{Y}_{2,2} & \dots & \dot{Y}_{2,n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dot{Y}_{n,1} & \dot{Y}_{n,2} & \dots & \dot{Y}_{n,n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \\ \dots \\ \dot{U}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{J}_1 \\ \dot{J}_2 \\ \dots \\ \dot{J}_n \end{bmatrix} . \quad (1.29)$$

Эту систему невозможно решить ввиду линейной зависимости уравнений. Избавиться от линейной зависимости УУН можно двумя способами [53]:

1. Исключением одного из уравнений системы УУН и заданием напряжения в одном из узлов сети. При этом предполагается, что частота переменного тока в системе будет оставаться неизменной, а необходимая мощность для ее поддержания будет компенсироваться из узла, уравнение которого

исключено. Такой узел называют балансирующим. В большинстве случаев он является еще и базисным, в котором задается напряжение.

2. Включением в систему уравнений дополнительной неизвестной – частоты переменного тока и введением дополнительного уравнения.

В практике расчетов УР наибольшее применение нашел первый способ.

При составлении матрицы узловых проводимостей необходимо выполнять правила учета трансформаторной ветви, включаемой между узлами  $i$  и  $j$ : при включении трансформаторной ветви образуются два новых элемента матрицы проводимостей – взаимные проводимости:

$$\dot{Y}_{ij} = \frac{\dot{Y}_T}{K_T}, \quad \dot{Y}_{ji} = \frac{\dot{Y}_T}{K_T}; \quad (1.30)$$

два диагональных элемента  $\dot{Y}_{ii}$  и  $\dot{Y}_{jj}$  изменяются на величины  $\Delta\dot{Y}_{ii}$  и  $\Delta\dot{Y}_{jj}$  [67]:

$$\Delta\dot{Y}_{ii} = -\dot{Y}_T, \quad \Delta\dot{Y}_{jj} = -\frac{\dot{Y}_T}{K_T^2}; \quad (1.31)$$

Наличие трансформаторов с комплексными коэффициентами трансформации нарушает симметрию матрицы проводимостей.

Главной особенностью построения системы уравнений является допущение о линейности параметров большинства элементов ЭС, т. к. попытка учета нелинейности всех параметров привела бы к многократному усложнению математических моделей. Однако система уравнений, описывающих режим работы сети, по-прежнему является нелинейной. Для ее решения в [67, 55] применен итерационный метод Зейделя. В работах [41, 15] была высказана идея применения для решения метода Ньютона. Впервые метод Ньютона был реализован для сети 100-200 узлов в [20]. При использовании данного метода производится линеаризация нелинейных уравнений путем разложения функций в ряд Тейлора. При этом уравнения баланса токов

$$\begin{aligned} \Phi_i(U', U'') &= g_{ii}U'_i - b_{ii}U''_i + \sum_{j=1}^m g_{ij}U'_j - \sum_{j=1}^m b_{ij}U''_j - \operatorname{Re}\left(\frac{\bar{S}_i}{U_i}\right) = 0, \\ \Psi_i(U', U'') &= b_{ii}U'_i + g_{ii}U''_i + \sum_{j=1}^m b_{ij}U'_j + \sum_{j=1}^m g_{ij}U''_j - \operatorname{Im}\left(\frac{\bar{S}_i}{U_i}\right) = 0; \end{aligned} \quad (1.32)$$

и уравнения балансов активных и реактивных мощностей

$$\begin{aligned}\Phi_i(U, \delta) &= g_{ii} U_i^2 + \sum_{j=1}^m U_i U_j \left[ g_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + b_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) \right] - P_i = 0, \\ \Psi_i(U, \delta) &= -b_{ii} U_i^2 + \sum_{j=1}^m U_i U_j \left[ g_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) - b_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) \right] - Q_i = 0;\end{aligned}\tag{1.33}$$

будут соответственно иметь вид

$$\begin{aligned}\Phi_i(U', U'') &= \Phi_i(U'_0, U''_0) + \sum_{j=1}^m \frac{\partial \Phi_i(U', U'')}{\partial U'_j} \Delta U'_j + \sum_{j=1}^m \frac{\partial \Phi_i(U', U'')}{\partial U''_j} \Delta U''_j, \\ \Psi_i(U', U'') &= \Psi_i(U'_0, U''_0) + \sum_{j=1}^m \frac{\partial \Psi_i(U', U'')}{\partial U'_j} \Delta U'_j + \sum_{j=1}^m \frac{\partial \Psi_i(U', U'')}{\partial U''_j} \Delta U''_j;\end{aligned}\tag{1.34}$$

и

$$\begin{aligned}\Phi_i(U, \delta) &= \Phi_i(U_0, \delta_0) + \sum_{j=1}^m \frac{\partial \Phi_i(\delta, U)}{\partial \delta_j} \Delta \delta_j + \sum_{j=1}^m \frac{\partial \Phi_i(\delta, U)}{\partial U_j} \Delta U_j, \\ \Psi_i(U, \delta) &= \Psi_i(U_0, \delta_0) + \sum_{j=1}^m \frac{\partial \Psi_i(\delta, U)}{\partial \delta_j} \Delta \delta_j + \sum_{j=1}^m \frac{\partial \Psi_i(\delta, U)}{\partial U_j} \Delta U_j.\end{aligned}\tag{1.35}$$

Объединяя уравнения для всех узлов, получаем систему линеаризованных уравнений, которая в общем виде записывается как

$$J \cdot \Delta X = -R,\tag{1.36}$$

где  $J$  – матрица Якоби (частных производных);  $\Delta X$  – вектор приращения неизвестных на очередной итерации;  $R$  – вектор невязок уравнений.

Стандартный метод Ньютона требует формирования матрицы Якоби и решения системы линеаризованных уравнений на каждой итерации. В упрощенной модификации метода Ньютона [113] реализуется отказ от учета диагональных поправок в линеаризованных уравнениях, что ускоряет сходимость, но снижает точность расчета. В другой разновидности метода Ньютона обратная матрица Якоби разлагается в ряд.

Моделирование переходных режимов ЭЭС так же играет важную роль в оценке оборудования и настройке его параметров. Переходные режимы определяют области допустимых режимов работы ЭЭС [97]. Это требует достаточно точных моделей динамических режимов работы [69].

Основным методом исследования переходных режимов работы ЭЭС является численное интегрирование описывающих ее дифференциальных уравнений [16, 12]. Анализ переходных процессов в ЭЭС затруднен нелинейностью магнитных цепей электрических машин и СТ и учетом нагрузки. Несмотря на появление эффективных численных методов [53] анализ переходных режимов, как правило, проводится с использованием метода наложения принужденного и свободного режимов при довольно грубых допущениях.

Для расчетов УР применяются широкий спектр отечественных и зарубежных программных комплексов, например, комплекс “EnergyUR”, разработанный на кафедре «Электрических систем» ИГЭУ, комплекс RastrWin, разработанный кафедрой «Автоматизированные электрические системы» УГТУ [20]. Параметры оборудования также задаются постоянными величинами.

Для анализа динамических режимов используется программный комплекс RuStab (в основе которого лежит ПК Mustang), разработанный Екатеринбургским фондом им. Д.А. Арзамасцева совместно с Объединенным диспетчерским управлением (ОДУ) Северо-Запада [97]. Расчеты УР проводятся с использованием метода Ньютона-Рафсона с улучшением сходимости тяжелых режимов по методу Матвеева. Система линейных алгебраических уравнений решается методом Гаусса [12].

К недостаткам существующих моделей расчета установившихся и динамических режимов работы можно отнести неучет нелинейных характеристик различных устройств и несимметрии магнитной системы устройств в несимметричных режимах. Как правило, в расчетах электромагнитные устройства учитываются усредненными табличными значениями. Это приводит к неверному определению предельных режимов и неверной настройке устройств релейной защиты и автоматики.

Таким образом, актуальной является задача построения математических моделей участка ЭЭС, содержащей СТ, для расчета статических и динамических режимов работы с учетом нелинейных характеристик СТ. Создание новых моделей ЭЭС возможно с использованием математических пакетов

(MATLAB Simulink SimPowerSystems, PDE TOOL) или с использованием синтеза пакетов (например, MATLAB совместно с COMSOL Multiphysics) [30, 31].

#### **1.4. Выбор объекта исследования**

Основным потребителем трансформаторного оборудования являются электросетевые и электроснабжающие компании. По данным ПАО «Россети» [84] наибольшее количество электросетевых объектов приходится на класс напряжений 6-10 кВ. Большую долю оборудования составляют СТ мощностью до 250 кВт. На крупных промышленных предприятиях более востребованы СТ мощностью до 1000 кВт. То есть особый интерес представляют СТ с номинальной мощностью до 1000 кВт включительно.

При рассмотрении сетей 10/0,4 кВ необходимо учесть некоторые особенности соединения обмоток трансформаторов. Трансформаторы с разными схемами соединения обмоток по-разному реагируют на протекающие по их обмоткам токи несимметричных и аварийных режимов.

Из рассмотрения различных видов несимметрии при различных соединениях обмоток [62, 63] можно сделать вывод о том, что применение трансформаторов со схемой «звезда/звезда» нецелесообразно без симметрирующего устройства. Применение же схемы соединения «треугольник/звезда» предполагает ограничение токов нулевой последовательности, которые замыкаются по обмотке ВН и не выходя при этом в сеть 10 кВ. Таким образом ограничиваются токи КЗ на стороне ВН.

При рассмотрении более высоких классов напряжений интерес представляют более сложные устройства: многообмоточные (в частности трехобмоточные) трансформаторы. Принцип работы такого устройства схож с двухобмоточными СТ, однако большую роль играют их конструктивные особенности. Класс трехобмоточных трансформаторов включает в себя устройства напряжением от 35 кВ. Их мощность варьируется до 16000 кВА.

Таким образом, целесообразно выбрать в качестве объекта исследования масляные и сухие двухобмоточные СТ мощностью до 1000 кВт, классом

напряжения 10/0,4 кВ, с соединением обмоток «треугольник/звезда», с устройствами РПН и/или ПБВ, с различными типами обмоток. Также примем к рассмотрению в качестве объекта исследования трехобмоточные трансформаторы с номинальным напряжением 35/10/0,4 кВ с соединением обмоток «звезда/треугольник/звезда».

### **Выводы по первой главе и постановка задач**

1. В настоящее время остро стоит вопрос конкурентоспособности малых и средних предприятий трансформаторостроения в условиях импортозамещения из-за ограниченности в технических и программных средствах в области проектирования СТ.

2. При разработке имитационных моделей СТ, предназначенных для расширенного поверочного расчета на стадии проектирования, необходим наиболее полный учет всех его характеристик, включая нелинейные характеристики и особенности топологии магнитного поля СТ.

3. В режиме КЗ большое влияние оказывают как собственные, так и взаимные индуктивности обмоток по полям вне магнитопровода СТ. Особенно сильно это влияние сказывается в переходных несимметричных режимах. Существующие методики расчета индуктивностей сложны и требуют больших вычислительных мощностей. Кроме того, они построены на большом количестве допущений, что недопустимо при построении имитационных моделей.

4. Как правило, при рассмотрении СТ в качестве элемента ЭС, он учитывается упрощенными моделями с усредненными значениями. Это может привести к неверному расчету аварийных режимов, что негативно скажется на выборе оборудования и работе энергосистемы в целом.

5. Для разработки имитационной модели СТ целесообразно использовать цепные модели. В этих целях рационально использовать математический пакет MATLAB, связанный с пакетом Microsoft Excel посредством интерфейса SpreadsheetLink, а также мультифизические пакеты (COMSOL Multiphysics, ANSYS Maxwell).

6. Для разработки модели участка ЭС целесообразно также использовать цепные модели, построенные на синтезе математических пакетов и мультифизических пакетов. При этом математические модели целесообразно строить на основе УУН, как наиболее оптимального с точки зрения количества рассматриваемых уравнений.

На основе данных выводов сформулируем следующие задачи

1. Сформировать методику и быстродействующую модель определения параметров КЗ СТ с учетом взаимного влияния полей вне магнитной системы. Данная модель должна интегрироваться в современные имитационные пакеты в качестве компонента САПР СТ.

2. Разработать уточненную имитационную модель СТ с учетом собственных и взаимных индуктивностей, а также его нелинейных характеристик, позволяющую рассматривать как статические, так и динамические симметричные, несимметричные и аварийные режимы работы в формате ЦД, т.е. с высокой точностью и быстродействием.

3. Создать уточненную математическую модель силового трансформатора для расчета симметричных, несимметричных и аварийных режимов работы участка сети с учетом нелинейных характеристик трансформатора, позволяющую рассматривать СТ в составе участка электроэнергетической сети.

4. Предложить структуру и программную реализацию подсистемы уточненного поверочного расчета в составе САПР СТ. Данная подсистема должна иметь возможность использования как при проектировании СТ с целью уменьшения количества натурных испытаний, так и при анализе влияния проектируемого СТ на работу участка электрической сети.

5. Апробировать разработанную математическую модель расчета собственных и взаимных индуктивностей, а также уточненные имитационные модели СТ.

## **2. Разработка имитационной модели силового трансформатора с учетом взаимного влияния полей обмоток вне магнитной системы**

Для решения поставленных задач необходимо в первую очередь проработать вопрос имитационного моделирования установившихся и переходных симметричных, несимметричных (в том числе и аварийных) режимов работы трансформатора в составе энергосети. Данные модели должны предусматривать два возможных варианта использования:

- 1) на стадии проектирования для расширенного поверочного расчета трансформатора в форме имитации тех условий эксплуатации, которые предусматриваются согласно техническому заданию (ТЗ) на его изготовление;
- 2) на стадии эксплуатации для превентивного анализа работы трансформатора в составе энергосетей.

Одной из главных проблем, возникающих на пути решения данной задачи, является проблема расчета параметров трансформатора, от точности которых зависит и точность моделирования. Параметры трансформатора, используемые при построении его имитационной модели, можно разделить на две группы:

- 1) параметры  $X_X$ , к которым относятся активное и индуктивное сопротивление ветви намагничивания;
- 2) параметры  $K_3$ , к которым относятся активные и индуктивные сопротивления обмоток.

В рамках единой программы разработки ЦД СТ, реализуемой в ИГЭУ, параметрам  $X_X$  посвящена отдельная диссертация. В настоящей диссертации особое внимание уделяется, в первую очередь, учету влияния полей вне магнитопровода, которое более всего сказывается на работе трансформатора именно в переходных несимметричных и аварийных режимах работы. Поэтому основной акцент в работе делается на уточненный расчет параметров  $K_3$  трансформатора.

## **2.1. Разработка моделей для расчета параметров короткого замыкания силовых трансформаторов**

### **2.1.1. Обоснование сокращения размерности модели магнитного поля для расчета полей вне магнитопровода**

Уточненный расчет параметров КЗ СТ возможен на основе задачи расчета магнитного поля рассеяния методом конечных элементов [72, 90]. Моделирование магнитного поля осуществляется с использованием САЕ-систем [73]. В диссертации для этого были использованы пакет COMSOL Multyphysics и библиотека EMLib, разработанная в ИГЭУ. Например, индуктивность  $i$ -й обмотки в данном случае определялась как отношение потокосцепления к току:

$$L_i = \frac{\Psi_i}{I_i}. \quad (2.1)$$

Для учета специфических особенностей расчетной области трансформатора (ступенчатая форма сердечника, вписанная в круг; обмотки ВН и НН имеют форму цилиндров; прямоугольная или овальная форма железного бака и т.п.) задачу расчета магнитного поля в общем случае необходимо решать в трехмерной постановке. Однако такая постановка требует построения сложной геометрической модели, которая должна триагнулироваться с высокой степенью детализации, приводящей к тому, что итоговая система будет содержать миллионы алгебраических уравнений [86]. В нелинейной постановке задачи с несколькими итерациями это приводит к тому, что даже при использовании методов ускорения сходимости расчетного процесса время расчета увеличивается до нескольких часов при отсутствии гарантии безаварийного завершения расчета и получения точного решения. Поэтому на данном этапе развития компьютерных технологий желательно свести задачу к 2D-постановке, то есть осуществить сокращение размерности [80].

Особенности конструкции СТ, на первый взгляд, не предполагают сведение полевой задачи к 2D-постановке ввиду отсутствия какой-либо определяющей симметрии. Тем не менее, такая возможность существует.

Магнитное поле трансформатора условно можно разделить на две составляющие:

- 1) основное поле, замыкающееся по сердечнику;
- 2) поле вне магнитной системы, силовые линии которого значительное расстояние проходят по немагнитной среде.

Для расчета основного поля целесообразно использовать фронтальную модель магнитной системы (рис. 2.1). При этом ширина стержня  $b_c$  принимается равной ширине наибольшего пакета стали в ступенчатом сечении сердечника. Длина пакета в третьем измерении принимается из условия [109]

$$a_c = \frac{S_a}{b_c}, \quad (2.2)$$

где  $S_a$  – активное сечение стали стержня.

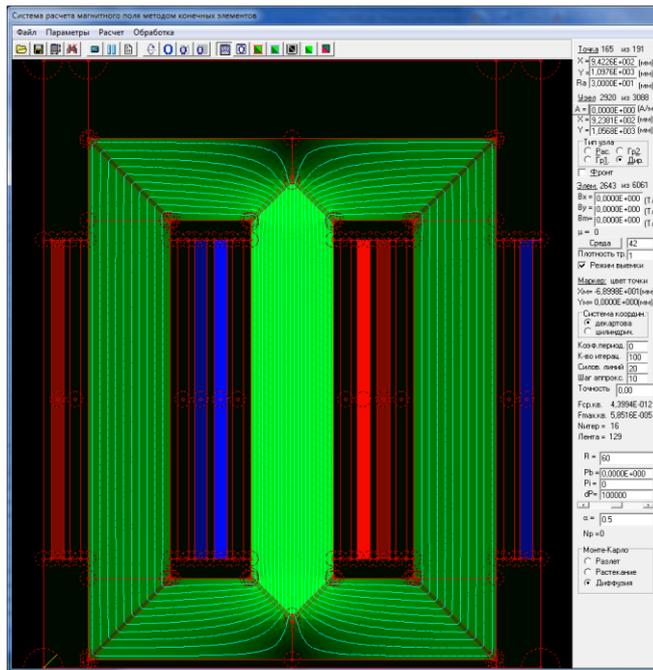


Рис. 2.1. Картина основного поля трансформатора в 2D-постановке

Для учета технологических зазоров в стыках стержней и ярем в модели предусматриваются немагнитные вставки [109], толщина которых  $\delta$  определяется исходя из требования получения в них при триангуляции элементов, близких к равносторонним, что обеспечивает максимальную точность расчета поля [43, 88]. Магнитная проницаемость вставки рассчитывается из условия

$$\mu_{\delta} = \mu_0 \frac{\delta_{\text{тз}}}{\delta}, \quad (2.3)$$

где  $\delta_{\text{тз}}$  – действительная толщина технологического зазора.

Помимо решения основной задачи учета влияния данной вставки на ток холостого хода, это обеспечивает практически параллельные силовые линии поля в стержнях и ярмах (см. рис. 2.1), что позволяет избавиться от необходимости учета влияния анизотропии магнитных свойств трансформаторной стали (см. ГОСТ 12119-80 [22]).

Как показали результаты серии численных расчетов при описанных допущениях величина основного магнитного потока, рассчитанная на фронтальной 2D-модели магнитного поля, не существенно отличается от величины, рассчитанной на 3D-модели (см. рис. П1.2 в приложении 1). Так, в данной серии расчетов, расхождение составило 2,1% (см. табл. 2.1).

Таблица 2.1. Сравнение результатов расчета основного поля и поля рассеяния на 2D- и 3D-модели трансформатора ТМГ-1000-10/0,4

Поток	3D-модель	2D-модель	$\Delta$ , %
Общий $\Phi$ , Вб	0,0474	0,0484	2,1
Вне магнитопровода $\Phi_{\sigma}$ , Вб	0,00044	0,0000116	97

Вместе с тем, как видно из табл. 2.1, расхождение в значениях потоков вне магнитной системы, полученное в данной серии расчетов (97%), не позволяет говорить о возможности использования для этого фронтальной 2D-модели. 3D-модель также не годится для расчета поля вне магнитной системы, так как полученное в ней значение потока вне магнитной системы ( $\Phi_{\sigma} = 0,00044$  Тл) на два порядка отличается от значения основного потока, то есть, по сути, находится в области погрешности метода конечных элементов. Поэтому было принято решение использовать для расчета поля вне магнитной системы отдельную модель, соответствующую изолированному стержню трансформатора с обмотками.

На рис. 2.2 приведена 3D-модель одного стержня трансформатора с условным цилиндрическим баком и без бака. Стержень имеет зубчатую

форму. Для упрощения модели ярма магнитопровода отсутствуют. С учетом цилиндрической симметрии для сокращения размерности задачи в данном случае можно использовать осесимметричную двухмерную постановку задачи (рис. 2.3). Результаты расчета представлены в табл. 2.2.

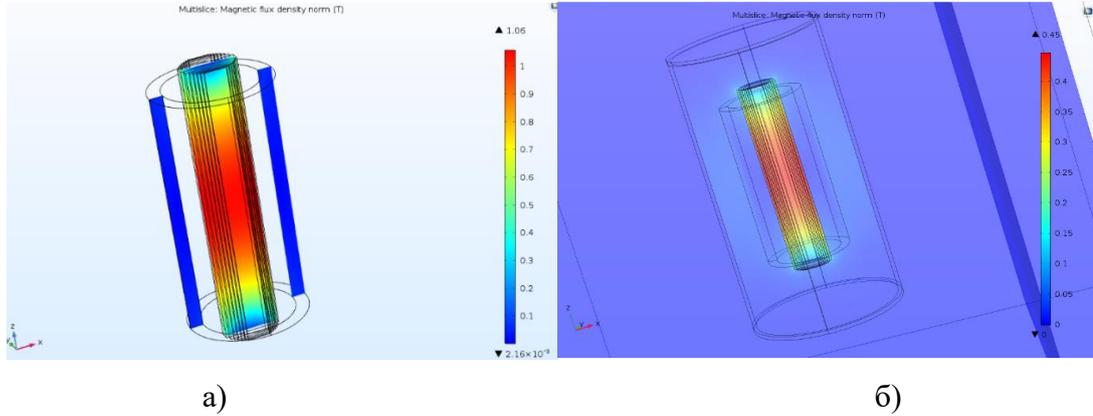


Рис. 2.2. Модель обмотки трансформатора с ферромагнитным сердечником в трехмерной постановке задачи: а – без бака; б – с условным баком

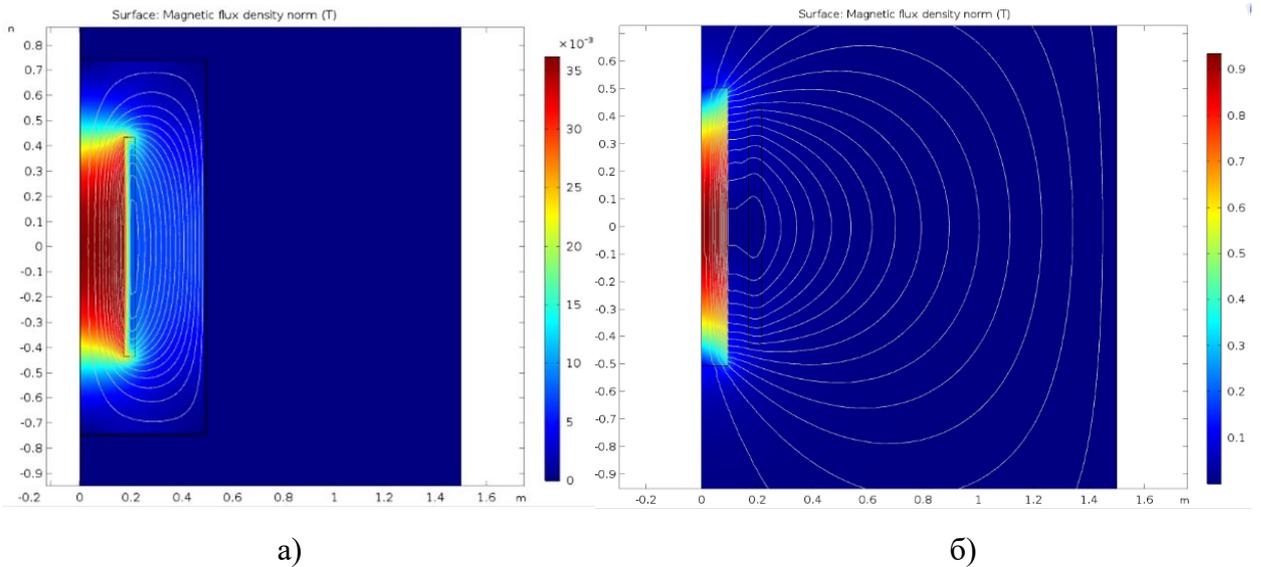


Рис.2.3. Катушка индуктивности без сердечника с условным баком (а) и с сердечником без бака в двухмерной осесимметричной постановке задачи

Таблица 2.2. Результаты расчета индуктивностей рассеяния

Случай	модель	$L_{\sigma}$	Случай	модель	$L_{\sigma}$
Одна катушка	2D	0,10663	Катушка+сердечник	2D	0,63537
	3D	0,10671		3D	0,6219
	расхождение	0,075%		расхождение	2.2%
Ка-тушка+усло-вие Дирихле	2D	0,09478	Катушка+сердечник+ усло-вие Дирихле	2D	0,38375
	3D	0,08351		3D	0,25661
	расхождение	13.5%		расхождение	49.5%

Окончание таблицы 2.2

Ка- тушка+усло- вие Неймана	2D	0,10711	Катушка+ сердечник+ условие Неймана	2D	0,65414
	3D	0,132		3D	0,79208
	расхождение	3,93%		расхождение	21,1%

Из анализа результатов следует, что расхождения в определении величины индуктивности катушек по полям вне магнитопровода в двухмерной и трехмерной задачах достигают 50 %. Причем очевидно, что точность 2D модели выше вследствие меньшего размера элементов сетки при равном количестве элементов в 2D и 3D моделях.

Вопрос задания граничных условий также не очевиден и требует дополнительных исследований [74]. Дело в том, что переменное магнитное поле частично вытесняется из ферромагнитных элементов: бака и магнитопровода. Моделирование бака с учетом эффекта вытеснения тока приводит к значительному росту количества элементов конечно-элементной сетки. Такую задачу пока еще можно считать не решаемой. Поэтому на внутренней границе бака желательно задать какое-то граничное условие. В табл. 2.2 приведены результаты расчета с граничными условиями Дирихле (полное вытеснение магнитного потока из бака) и условиями Неймана (полное отсутствие вытеснения магнитного потока). Результаты расчета при этом различаются на порядок и более. Также видим, что большое влияние на величину индуктивности оказывает наличие сердечника.

Следует отметить, что в случае трансформатора картина поля вне магнитной системы будет иметь несколько другой вид, поскольку в этом случае основные катушки первичной и вторичной обмоток будут включены встречно и поток в сердечнике будет мал. На рис. П2.1 – П2.4. представлены результаты серии расчетов для этих случаев. Также рассмотрен случай исключения сердечника из расчетной области путем учета условия Дирихле на его границе, что соответствует полному вытеснению магнитного потока из сердечника. Величины определенных индуктивностей приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3. Результаты расчета индуктивностей двух соосных катушек

Случай	мод.	$L_{\sigma 1}$	$L_{\sigma 2}$	Случай	мод.	$L_{\sigma 1}$	$L_{\sigma 2}$
Соосные катушки	2D	0.04908	$6.0149 \cdot 10^{-7}$	Катушки+ сердечник	2D	0.01409	$1.935 \cdot 10^{-5}$
	3D	0.049137	$6.2486 \cdot 10^{-7}$		3D	0.015	$1.8824 \cdot 10^{-5}$
	$\Delta$	0.11%	3.74%		$\Delta$	6.07%	2.718%
Катушки+ условие Дирихле	2D	0.043103	$9.7627 \cdot 10^{-7}$	Катушки+ сердечник+ условие Дирихле	2D	0.00468	$2.4212 \cdot 10^{-5}$
	3D	0.03739	$24.626 \cdot 10^{-7}$		3D	0.000927	$2.6011 \cdot 10^{-5}$
	$\Delta$	13,25%	60,36%		$\Delta$	80.192%	6.92%
Катушки+ условие Неймана	2D	0.04908	$5.9936 \cdot 10^{-7}$	Катушки+ сердечник+ условие Неймана	2D	0.0135	$1.9685 \cdot 10^{-5}$
	3D	0.051467	$12.358 \cdot 10^{-7}$		3D	0.021434	$1.5528 \cdot 10^{-5}$
	$\Delta$	4,64%	51,5%		$\Delta$	37.02%	21.12%
Катушки без сердечника	2D	0.05072	$1.5864 \cdot 10^{-6}$				
	3D	0,050566	$1,4677 \cdot 10^{-6}$				
	$\Delta$	0,304%	7,482%				

Из результатов расчета индуктивностей следует, что наилучшая сходимость между двух- и трехмерной постановкой задачи показывают модели, использующие «открытую» задачу, т.е. без учета граничных условий по стенкам бака, что соответствует случаю сухих трансформаторов.

Как и в предыдущем исследовании, вопрос задания условий на границе расчетной области требует дополнительного анализа [74]. Для решения данной проблемы была поставлена задача определения глубины проникновения переменного магнитного поля в сплошные ферромагнитные элементы конструкции трансформатора.

### 2.1.2. Обоснование выбора граничных условий в модели магнитного поля трансформатора

При работе трансформатора часть потока вне магнитной системы замыкается по ферромагнитным деталям его конструкции – стенки бака, прессующие балки ярм, прессующие кольца обмоток и т.д.

Определение величины потока, замыкающейся по стенке бака, в долях от общего потока вблизи стенки бака необходимо как для обоснования выбора

граничных условий, так и для определения дополнительных потерь КЗ, рассеивающихся в баке трансформатора.

Для исследования эффекта вытеснения магнитного поля из бака была создана тестовая модель, в которой заданы две области: первая имитирует стальную стенку бака с электропроводностью  $10,6 \times 10^6$  См/м и нелинейной кривой намагничивания, вторая среда заполнена воздухом. Данная область представлена на рис. 2.4. Сверху присутствует область из стали 3, имитирующая массивную ферромагнитную среду. В точках 1 и 2 задавался ток с частотой от 50 до 700 Гц, для моделирования потока рассеяния. Задача решается с учетом вихревых токов. В зависимости от величины заданного тока в точке 3 регистрировалась величина магнитной индукции.

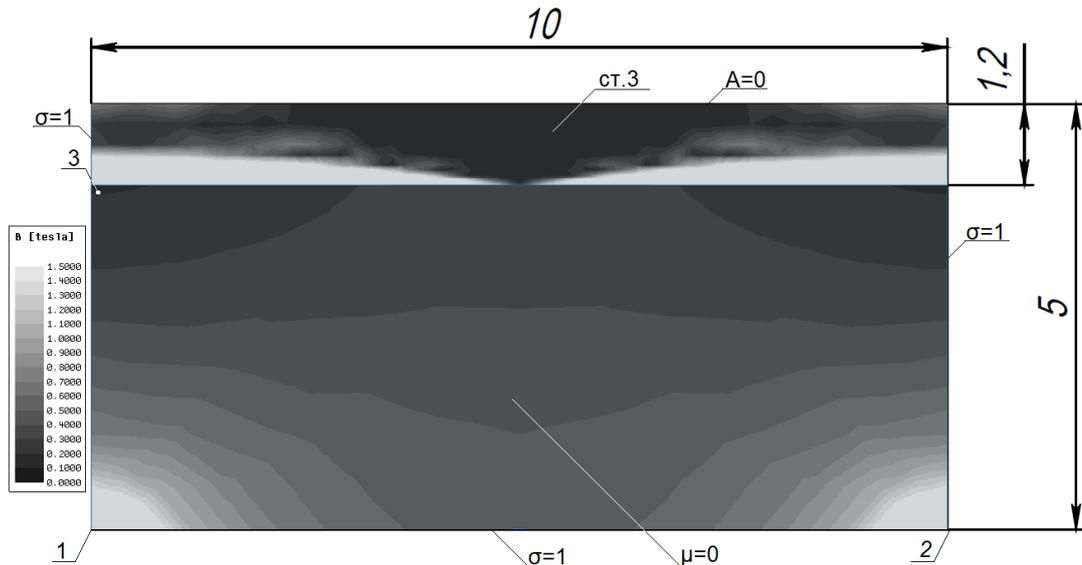


Рис. 2.4. Расчетная область для исследования эффекта вытеснения

Были проведены следующие исследования:

1. На границе раздела двух сред задано условие Неймана (рис. 3.1) (полное проникновение поля в бак). Картина распространения магнитного поля для рассматриваемого случая приведена на рис. ПЗ.1. Графики распределения индукции на оси симметрии расчетной области при разных частотах представлен на рис. ПЗ.2.

2. На границе раздела двух сред задано условие Дирихле (полное вытеснение поля из бака). Картина распространения поля для рассматриваемого

случая приведена на рис. ПЗ.3. Графики распределения индукции на оси симметрии при разных частотах представлен на рис. ПЗ.4.

3. На границе раздела двух сред задано условие открытой задачи. Картина распространения поля для рассматриваемого случая приведена на рис. ПЗ.5. Графики распределения индукции на оси симметрии при разных частотах представлен на рис. ПЗ.6.

4. Задача с вытеснением магнитного поля из бака (с учетом вихревых токов). Картина распространения поля для рассматриваемого случая приведена на рис. 2.5. Графики распределения индукции на оси симметрии при разных частотах представлен на рис. 2.6.

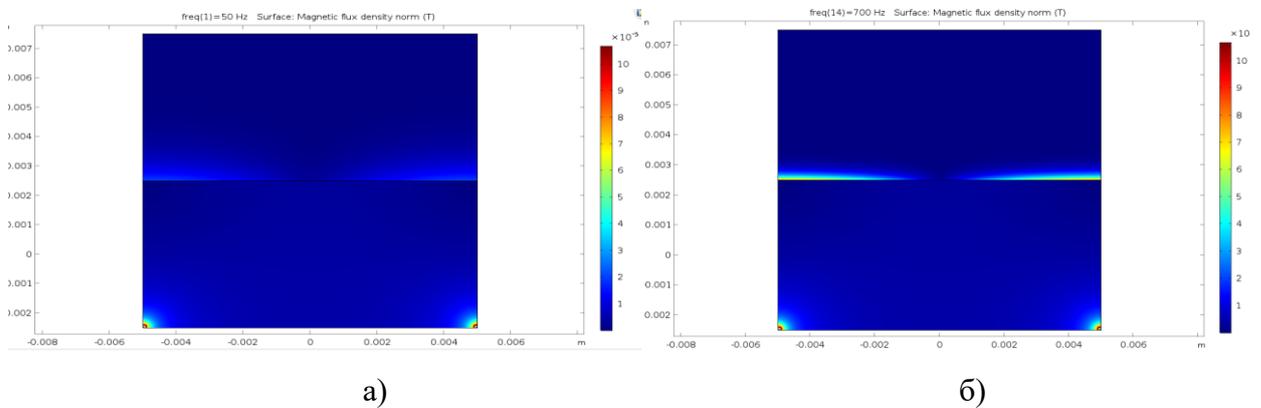


Рис. 2.5. Картина распространения поля при 50 Гц (а) и при 700 Гц (б) (задача с учетом вихревых токов)

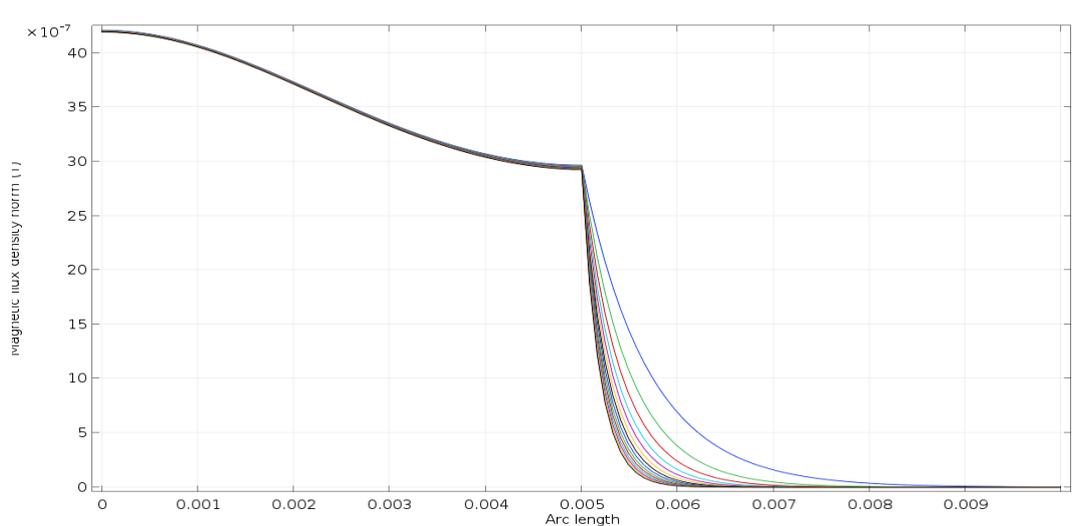


Рис. 2.6. Распределение индукции на оси симметрии при частотах от 50 до 700 Гц

Величина общего потока вблизи стенки бака для рассмотренных случаев на частоте 50 Гц приведена в таблице 2.4.

Таблица 2.4. Результаты расчета величины основного магнитного потока на частоте 50 Гц

Случай	Условие Дирихле	Условие Неймана	Открытая задача	Задача с вытеснением тока
Общий поток вблизи стенки бака, Вб	$9.8584 \cdot 10^{-8}$	$1.0647 \cdot 10^{-7}$	$1.0037 \cdot 10^{-7}$	$1.0643 \cdot 10^{-7}$

Из полученных результатов можно сделать вывод о том, что к реальной задаче с вытеснением поля в баке на частоте 50 Гц наиболее близка задача с граничным условием Неймана на границе раздела двух сред (ввиду наиболее близких значений общего потока вблизи стенки бака для случаев задачи с вытеснением тока и с условием Неймана на границе). При этом коэффициент, учитывающий изменение величины общего потока вблизи стенки бака из-за влияния бака близок к единице

$$k_{\sigma} = \frac{\Phi_{\text{вытесн}}}{\Phi_{\text{Нейман}}} = \frac{1,0643 \cdot 10^{-7}}{1,0647 \cdot 10^{-7}} = 0,99. \quad (2.4)$$

### 2.1.3. Методика расчета активных сопротивлений в имитационной модели силового трансформатора

Активное сопротивление обмоток, используемое в схемах замещения трансформатора (см. (1.2) и рис. 1.1), в общем случае отличается от омического сопротивления, вычисляемого по формуле

$$r_{\Pi} = \rho \frac{\ell}{S}, \quad (2.5)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление материала проводника;  $\ell$  – длина проводника;  $S$  – сечение проводника.

Дело в том, что при протекании переменного тока по проводнику зачастую приходится учитывать эффект вытеснения тока к периферии проводника, что уменьшает так называемое эффективное сечение проводника и увеличивает его сопротивление. Кроме того, к этому сопротивлению прибавляется сопротивление, соответствующее добавочным потерям трансформатора, вызванным вихревыми токами в массивных ферромагнитных элементах его

конструкции (в баке, консолях, шпильках и т.п.). Поэтому в общем случае справедлива формула

$$r = \rho \frac{\ell}{S} + \frac{P_d}{I^2}, \quad (2.5)$$

где  $P_d$  – добавочные потери в трансформаторе, отнесенные к рассматриваемой обмотке (наибольший вклад в добавочные потери вносят обмотки с большим током);  $I$  – ток в обмотке.

Расчет добавочных потерь представляет собой сложную задачу, решение которой основано на ряде допущений при построении поля рассеяния в области обмотки и вблизи ферромагнитных деталей, на учете среднестатистических свойств материала и др. [98].

Для учета эффекта вытеснения тока в  $k$ -м проводнике обмотки (см. рис. 2.7) в [98] предлагается формула

$$P_{dk} = P_{оснк} k_{dk} = P_{оснк} \cdot \left[ 1 + 5,2\beta^2 \left( \frac{f}{\rho} \right)^2 a^4 (k - 0,5)^2 \right], \quad (2.6)$$

где  $P_{оснк}$  – основные потери в  $k$ -м проводнике, рассчитанные при условии отсутствия эффекта вытеснения тока;  $f$  – частота тока, Гц;  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление металла обмоток, мкОм·м;  $a$  – размер проводника в направлении, перпендикулярном к линиям магнитной индукции поля рассеяния, м;  $\beta$  – коэффициент, который определяется по формуле

$$\beta = \frac{b \cdot m}{\ell_{об}} k_p, \quad (2.7)$$

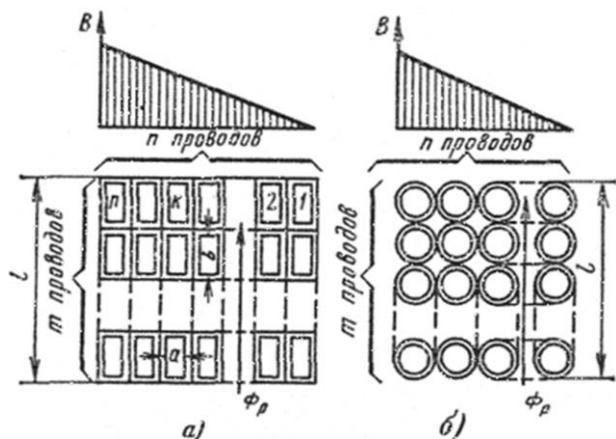


Рис. 2.7. К определению добавочных потерь в обмотках: а – из прямоугольного провода; б – из круглого провода

где  $b$ ,  $m$  – соответственно размер проводника и число проводников в направлении, параллельном линиям магнитной индукции поля рассеяния;  $\ell_{об}$  – общий размер обмотки в направлении, параллельном направлению линий магнитной индукции поля рассеяния, м;  $d$  – диаметр круглого проводника, м;  $k_p$  – коэффициент приведения поля рассеяния (коэффициент Роговского).

Данная формула дает достаточно хорошее приближение, проверенное длительным периодом использования предложенной в [98] методики в мировой практике проектирования трансформаторов. В некоторых частных случаях приходится проводить дополнительное исследование на предмет учета влияния эффекта вытеснения тока. Например, в [101] приведена методика расчета эффекта вытеснения тока в фольговых обмотках трансформаторов на основе электрических схема замещения.

Гораздо меньшая точность может быть достигнута при расчете добавочных потерь в металлоконструкциях трансформатора. Так, в [98] для трансформаторов мощностью от 100 до 63000 кВА предлагается формула

$$P_{\sigma} \approx 10kS, \quad (2.8)$$

где  $S$  – полная мощность трансформатора, кВА;  $k$  – коэффициент, определяемый мощностью трансформатора.

Для уточненного расчет потерь мощности в баке на частоте 50 Гц при мощности СТ 10000-63000 кВА там же предлагается формуле

$$P_{\sigma} \approx \frac{k u_p^2 \Phi^2 l^3 10^4}{p_{\sigma} (\ell_{об} + 2(R - r_{12}))^2}, \quad (2.9)$$

где  $k$  – эмпирический коэффициент;  $\Phi$  – поток одного стержня, Вб;  $p_{\sigma}$  – периметр гладкого бака, м;  $R$  – средний радиус овального бака, м;  $R = (A+B-2C)/4$  ( $A$  – длина бака,  $B$  – ширина бака,  $C$  – расстояние между осями стержней);  $r_{12}$  – средний радиус канала рассеяния, м.

Данные формулы носят очень приближенный характер. На большой частоте (для высокочастотных трансформаторов) они вообще неприменимы.

Для уточнения потерь в стенках бака СТ, а также для расчета потерь в стенках бака трансформаторов (в том числе высокочастотных – ВЧТ) нами была разработана методика. Задача решалась на модели, приведенной на рис. 2.4. Максимальное значение индукции фиксировалось в точке 3, расположенной вблизи стенки бака. Потери от вихревых токов фиксировались в массиве железа. В результате была получена зависимость потерь в стенке бака от индукции около стенки бака при разных частотах. Эти зависимости представлены на рис. 2.8, а также в табл. П4.1.

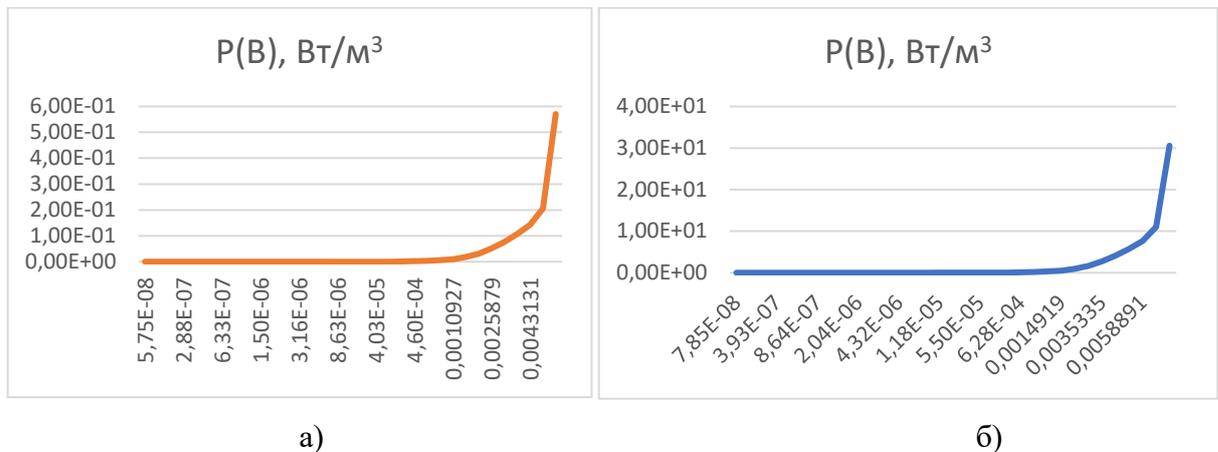


Рис. 2.8. Зависимость потерь в стенке бака от индукции возле стенки бака при 50 Гц (а) и 700 Гц (б)

Для уточненного расчета потерь в стенках бака трансформатора решалась двухмерная полевая задача, в которой трансформатор рассчитывался в торцевом сечении в осесимметричной постановке с заданными граничными условиями Неймана. В данном случае все магнитное поле, создаваемое обмоткой с протекающим по ней номинальным током, является полем вне магнитной системы, так как сердечник незамкнут. Для построения модели разработан параметрический генератор конечно-элементной модели трансформатора, позволяющий автоматически генерировать серии полевых моделей полей вне магнитопровода по заданным геометрическим размерам конкретного трансформатора. С этой целью была использована библиотека конечно-элементного моделирования магнитного поля EMLib [99]. Сам параметрический генератор представляет собой VBA-макрос, интегрированный в САПР трансформаторов

TransCAE, функционирующей в среде Microsoft Excel. Методика построения подобных параметрических генераторов и организации численных исследований с данными моделями подробно описана в [102]. Модель, созданная с помощью данного параметрического генератора для ТМГ-1000-10/0,4 с результатами расчета поля вне магнитопровода приведена на рис. 2.9.

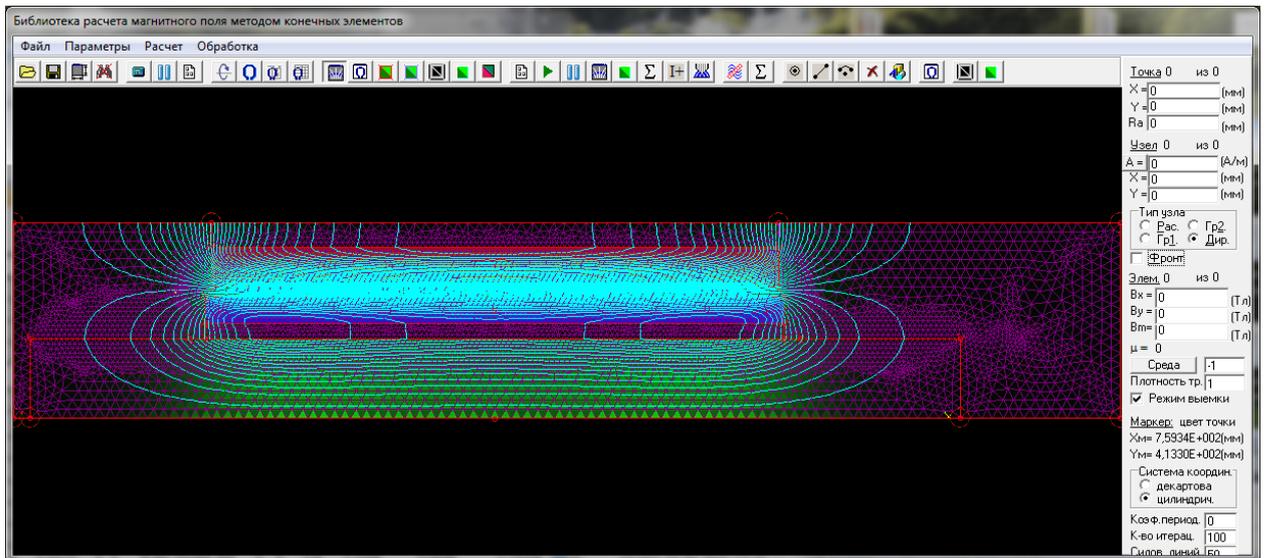


Рис. 2.9. Картина магнитного поля при частоте 50 Гц

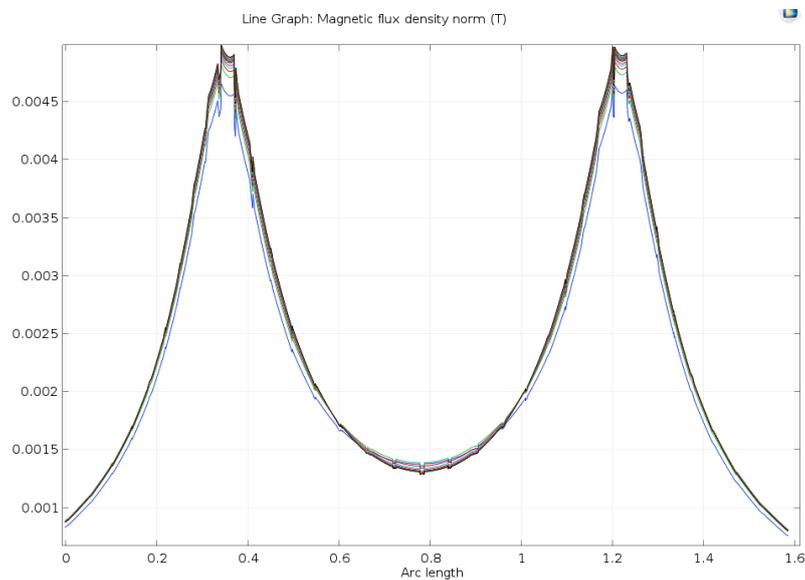


Рис. 2.10. распределение индукции вдоль боковой границы расчетной области для частот от 50 до 700 Гц

Вдоль границы расчетной области, заменяющей стенку бака, снималась величина индукции магнитного поля. Кривая распределения индукции вдоль периметра бака, полученная с помощью данной модели, приведена на

рис. 2.10. По результатам расчета для СТ, работающего на частоте 50 Гц, с учетом данных табл. П4.1 были определены потери в стенках бака. Они составили 33,5 Вт. Величина потерь в баке и элементах конструкции, определенная по формуле (2.8), составляет 250 Вт. Расхождение этих величин составило 86,6%. Данное расхождение обусловлено как неточностью формулы (2.8), так и тем, что при определении потерь с использованием предложенной методики не были учтены потери в массивных металлических элементах конструкции (прессующие балки, шпильки и т.п.) и прочие добавочные потери.

Методика уточненного расчета потерь в баке от вихревых токов включает в себя следующие позиции:

- 1) построение расчетной области для расчета потоков вне магнитопровода трансформатора, аналогичной рис. 2.9;
- 2) расчет магнитного поля и построение кривой распределения магнитной индукции в стенке бака, аналогичной рис. 2.10.
- 3) определение потерь в баке по формуле

$$P_{\sigma} \approx \gamma d_b L_b \int_{\ell_{\sigma}} P(B(y_b)) dy \approx \gamma d_b L_b \sum_{i=1}^N P(B(y_{bi})) \Delta y_b, \quad (2.10)$$

где  $\gamma$  – удельный вес стали;  $d_b$  – толщина стенки бака;  $L_b$  – периметр бака в горизонтальном сечении;  $\ell_{\sigma}$  – периметр бака в вертикальном сечении;  $P(B)$  – аппроксимированная сплайнами зависимость по рис. 2.10;  $y_b$  – координата точки на периметре бака в горизонтальном сечении;  $\Delta y_b$  – шаг дискретизации на периметре бака в горизонтальном сечении.

- 4) уточненный расчет добавочных потерь в трансформаторе  $P_d$  с учетом (2.10);
- 5) расчет активного сопротивления обмотки в схеме замещения трансформатора по (2.5).

Таким образом, приведенная методика может быть применена для уточнения потерь в баке СТ. Особенно это актуально для трансформаторов, работающих на высоких частотах. Однако и в трансформаторах, работающих на промышленной частоте 50 Гц она способна дать более точные результаты.

### 2.1.4. Модели для расчета индуктивностей многообмоточных трансформаторов на основе расчета поля вне магнитной системы

В принятой на сегодня инженерной методике построения электрической схемы замещения трансформатора (см. рис. 1.1) в ветвях, соответствующих обмоткам, присутствуют комплексные сопротивления, значения которых определяется из опыта КЗ [107]. Поэтому одним из подходов, позволяющих рассчитать индуктивные составляющие этих сопротивлений, является подход, основанный на имитации опыта КЗ. При этом вторичная обмотка замыкается накоротко, а к первичной подводится пониженное напряжение. Так как ветвью намагничивания в данном случае можно пренебречь, то можно утверждать, что первичная и вторичная обмотки трансформатора при этом создают приблизительно равные по величине и противоположно направленные намагничивающие силы (НС)

$$\dot{F}_1 \approx -\dot{F}_2. \quad (2.11)$$

В модели, представленной на рис. 2.9, это соответствует токам обмоток

$$i_2 \approx -i_1 \frac{w_1}{w_2}, \quad (2.12)$$

где  $w_1$  и  $w_2$  – количество витков в первичной и вторичной обмотках.

Картина магнитного поля для этого случая с заданными граничными условиями Неймана представлена на рис. 2.9.

Индуктивность рассеяния каждой  $k$ -й обмотки при этом рассчитывается по формуле

$$L_{\sigma k} = \frac{\Psi_{\sigma k}}{i_k}, \quad (2.13)$$

где  $\Psi_{\sigma k}$  – потокосцепление  $k$ -й обмотки, определяемое из расчета поля.

Приведенный подход может быть использован только для расчета установившихся симметричных режимов работы трансформатора, когда справедливы принятые здесь допущения о соотношении НС обмоток. Однако уже в

двухобмоточных трансформаторах данный подход к расчету индуктивностей обмоток по полям вне магнитопровода не является корректным, так как мгновенные значения токов первичных и вторичных обмоток разных фаз могут изменяться по непредсказуемым законам, не соответствующим условию (2.11).

Особенно явно данное противоречие проявляется в случае моделирования трехобмоточных трансформаторов, где при данном подходе приходится рассчитывать магнитные поля, созданные каждой парой обмоток, как это показано на рис. 2.11.

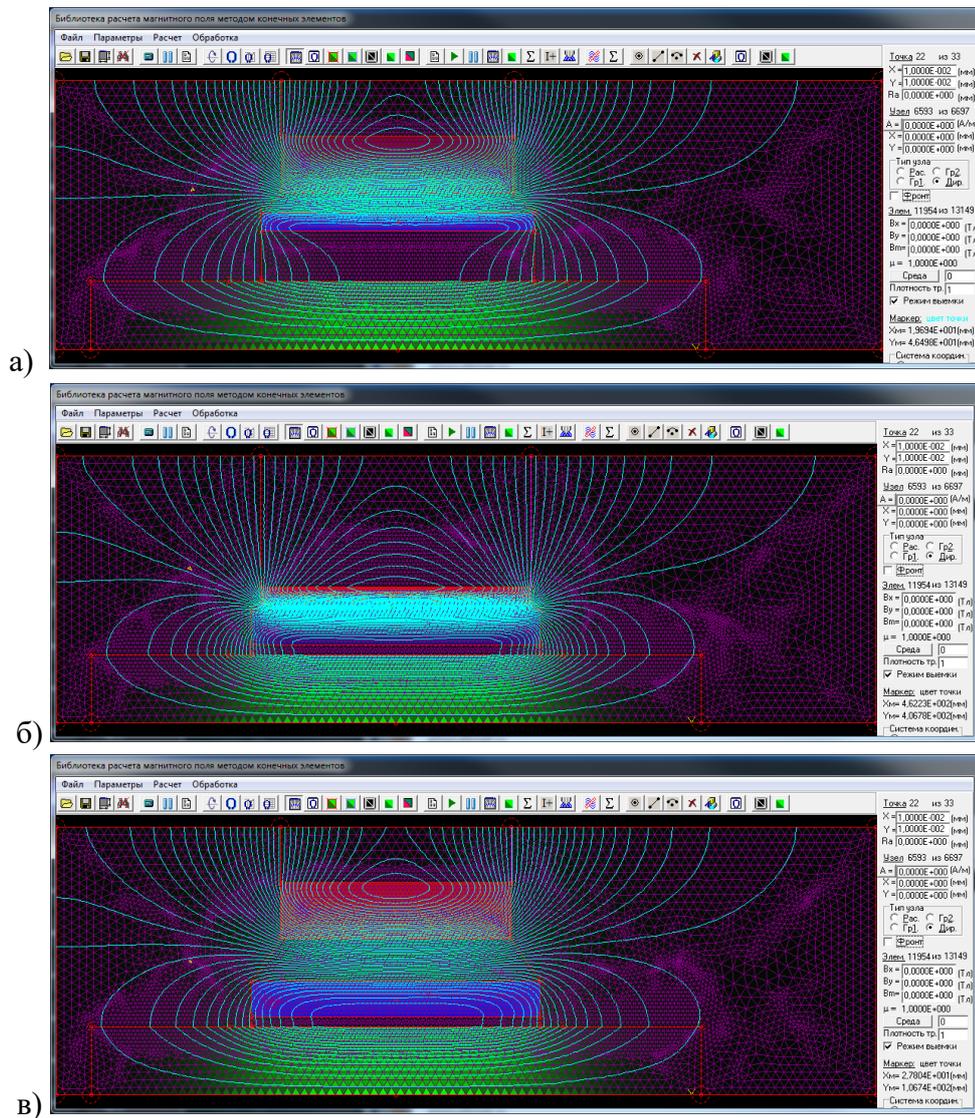


Рис.2.11. Поле вне магнитопровода при имитации КЗ пар обмоток ВН-СН (а), СН-НН (б), ВН-НН (в)

По результатам моделирования в данном случае были получены следующие значения собственных индуктивностей:

- 1) ВН-СН:  $L_{\sigma_{ВН}}=0,467465$  Гн,  $L_{\sigma_{СН}}=0,046698$  Гн;
- 2) ВН-НН:  $L_{\sigma_{ВН}}=0,611041$  Гн,  $L_{\sigma_{НН}}=3,84 \cdot 10^{-5}$  Гн;
- 3) СН-НН:  $L_{\sigma_{СН}}=0,029769$  Гн,  $L_{\sigma_{НН}}= 1,25 \cdot 10^{-5}$  Гн.

Видим, что индуктивности одних и тех же обмоток в разных опытах имеют различную величину, что противоречит физическому смыслу. Следовательно, данная методика неприменима для определения индуктивностей обмоток трехобмоточного трансформатора по полям вне магнитопровода.

Второй подход более универсален. Он основан на построении матрицы индуктивностей обмоток. При этом моделируются собственные поля каждой из обмоток, как это показано на рис. 2.12 (под полем обмотки в данном случае понимается поле, замыкающееся по воздуху вокруг данной фазы).

При этом величина индуктивности катушки, определенной данным путем, учитывает в себе еще и взаимные индуктивности с другими катушками. Индуктивность двухобмоточного трансформатора по полям вне магнитной системы в этом случае может быть определена как [38, 101]

$$L_{\sigma} = L_1 + L_2 \left( \frac{w_1}{w_2} \right)^2 - L_{\sigma_{12}} \left( \frac{w_1}{w_2} \right) - L_{\sigma_{21}} \left( \frac{w_1}{w_2} \right), \quad (2.14)$$

где  $L_1, L_2$  – собственные индуктивности первичной и вторичной обмоток;  $L_{\sigma_{12}} \approx L_{\sigma_{21}}$  – взаимные индуктивности по полям вне магнитной системы первичной и вторичной обмоток, рассчитываемые по формуле

$$L_{\sigma_{pq}} = \frac{\Psi_{\sigma p}}{i_q}. \quad (2.15)$$

Формула (2.14) позволяет рассчитать индуктивное сопротивление КЗ трансформатора по формуле

$$X_{\sigma_{КЗ}} = 2\pi f \cdot L_{\sigma}, \quad (2.16)$$

но оказывается бесполезной для имитационного моделирования трансформатора в произвольных режимах работы.

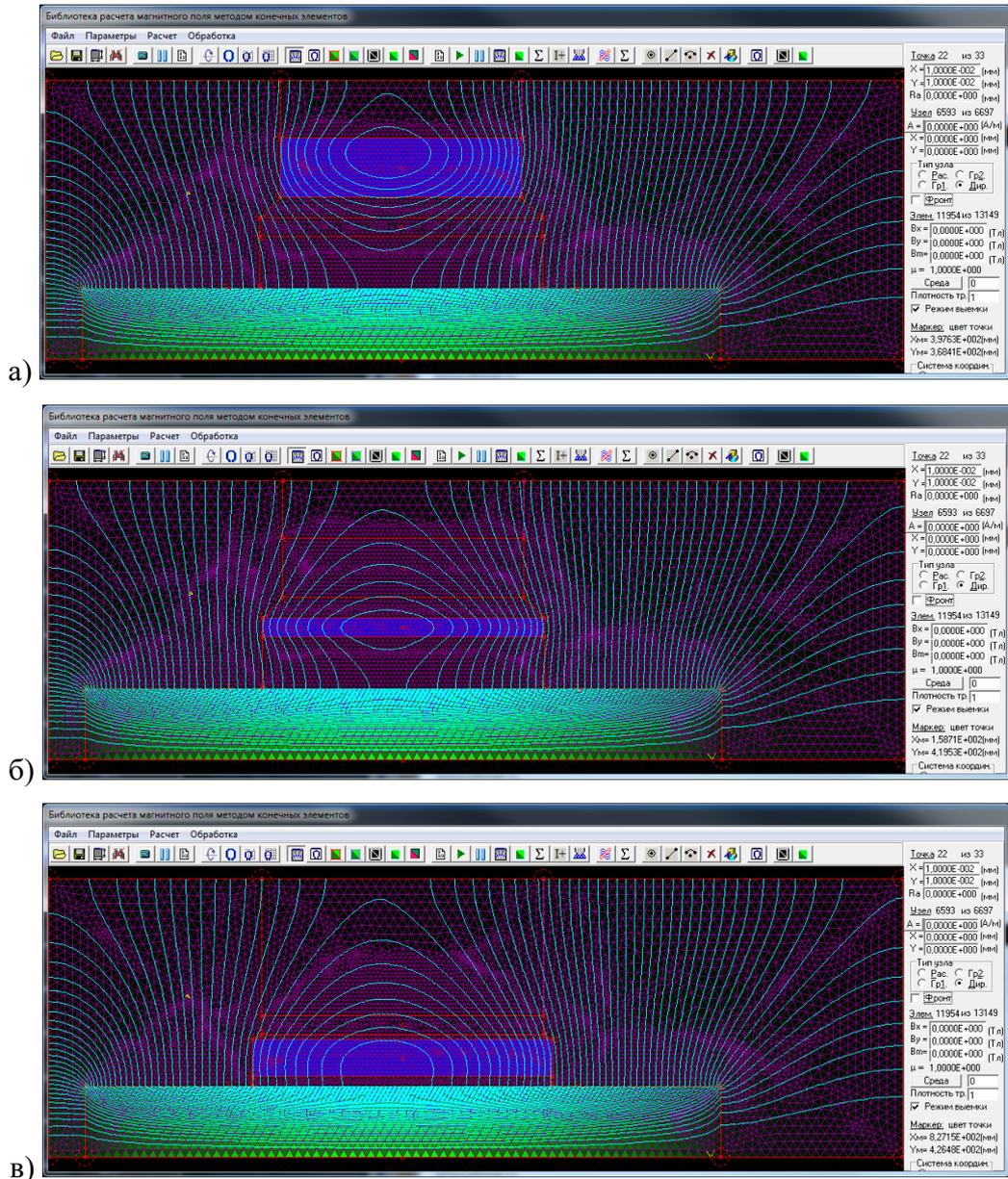


Рис. 2.12. Собственные поля обмоток ВН (а), СН (б), НН (в)

Более полезной оказывается сформированная по результатам расчета собственных полей матрица индуктивностей вида:

$$1) \text{ двухобмоточный трансформатор: } [L_{\sigma}] = \begin{bmatrix} L_{\sigma 11} & L_{\sigma 12} \\ L_{\sigma 21} & L_{\sigma 22} \end{bmatrix}; \quad (2.17)$$

$$2) \text{ трехобмоточный трансформатор: } [L_{\sigma}] = \begin{bmatrix} L_{\sigma 11} & L_{\sigma 12} & L_{\sigma 13} \\ L_{\sigma 21} & L_{\sigma 22} & L_{\sigma 23} \\ L_{\sigma 31} & L_{\sigma 32} & L_{\sigma 33} \end{bmatrix}. \quad (2.18)$$

Однако использование данного подхода требует отказа от традиционной схемы замещения, приведенной на рис. 1.1, о чем будет сказано ниже.

### 2.1.5. Модель для расчета влияния на параметры КЗ обмоток, расположенных на разных стержнях

Выше речь шла только об определении собственных и взаимных индуктивностей полей вне магнитной системы, а также взаимных индуктивностей для катушек, находящихся на одном стержне. Для определения взаимной индуктивности несоосных катушек данная методика неприменима, поскольку предполагает осесимметричную постановку задачи по расчету магнитного поля.

Влияние полей несоосных катушек друг на друга существенно меньше, но и оно может влиять на результаты имитационного моделирования трансформатора.

Определение взаимных индуктивностей для несоосных катушек с использованием полевой задачи возможно только при трехмерном моделировании, что, как уже отмечалось, является нецелесообразным.

Решением данной задачи может являться аналитический расчет взаимных индуктивностей. Данная задача может быть решена в линейной постановке, поскольку поле вне магнитной системы замыкается преимущественно по воздуху. Влияние магнитопровода и бака в данном случае приходится учитывать с использованием полуэмпирических коэффициентов, как это реализовано в [97]. Аналитически можно определить и собственные индуктивности.

Расчет собственной и взаимной индуктивности катушек, находящихся в воздухе, сводится к расчету магнитного потока через определенное сечение. В свою очередь магнитный поток определяется как [21]

$$\Phi = \iint \vec{B} \cdot \vec{n} \cdot dS. \quad (2.19)$$

Для вычисления данного интеграла необходимо знать зависимость индукции от координат и уравнение площадки, по которой ведется интегрирование. В общем случае вычисление такого поверхностного интеграла первого рода сводится к вычислению двойного определенного интеграла. Используя понятие векторного потенциала магнитного поля, можно свести вычисление

потока к одинарному определенному интегралу, что занимает меньше времени. Функцию векторного потенциала магнитного поля от координат можно определить с помощью закона Био-Савара-Лапласа [21]. Бесконечно маленький элемент проводника с током создает индукцию в точке, равную:

$$\vec{\Delta B} = \frac{\mu}{4\pi} \cdot \frac{[\mathbf{I} \cdot \vec{\Delta l}; \vec{r}]}{r^3}, \quad (2.20)$$

где  $\vec{\Delta l} = \Delta x_n \cdot \vec{i} + \Delta y_n \cdot \vec{j} + \Delta z_n \cdot \vec{k}$  – вектор, направленный по касательной к элементу проводника и имеющий модуль, равный длине элемента проводника.

Преобразование одного из членов векторного произведения в законе Био-Савара-Лапласа дает выражение

$$\frac{\vec{r}}{r^3} = -\text{grad} \left[ \frac{1}{r} \right]. \quad (2.21)$$

Тогда закон Био-Савара-Лапласа принимает вид

$$\vec{\Delta B} = \frac{\mu}{4\pi} \cdot \left[ \mathbf{I} \cdot \vec{\Delta l}; -\text{grad} \left[ \frac{1}{r} \right] \right]. \quad (2.22)$$

Преобразование векторного произведения с учетом того, что координаты элемента проводника с током не зависят от координат вычисления индукции, дает выражение вида

$$\vec{\Delta B} = \frac{\mu}{4\pi} \cdot \text{rot} \left[ \frac{\mathbf{I} \cdot \vec{\Delta l}}{r} \right]. \quad (2.23)$$

По принципу суперпозиции итоговая магнитная индукция в точке равна векторной сумме магнитных индукций, созданных элементами проводника с током. С учетом этого из определения векторного потенциала магнитного поля следует, что функция векторного магнитного потенциала имеет вид:

$$\vec{A} = \sum_1^2 \frac{\mu}{4\pi} \cdot \frac{\mathbf{I} \cdot \vec{\Delta l}}{r}. \quad (2.24)$$

Тогда поток вектора магнитной индукции рассчитывается с помощью циркуляции векторного потенциала по контуру, который ограничивает площадку для расчета потока:

$$\Phi = \iint \vec{B} \cdot \vec{n} \cdot dS = \oint \vec{A} \cdot d\vec{l}. \quad (2.25)$$

Первым приближением кольцевого витка, входящего в состав катушки индуктивности, является бесконечно тонкий кольцевой виток с током. Расчет векторного потенциала, созданного таким витком, позволяет рассчитать потоки вектора магнитной индукции. Векторный потенциал, созданный бесконечно тонким кольцевым витком с током, – это вектор, перпендикулярный плоскости, проходящей через радиус, проведенный из центра витка в точку вычисления, и перпендикулярной плоскости этого витка [17].

Кольцевой виток с током, имеющий определенную форму сечения, можно представить, как структуру бесконечно тонких кольцевых витков с током. Принцип суперпозиции позволяет рассчитать итоговый вектор магнитного потенциала путем сложения векторных потенциалов, созданных бесконечно тонкими кольцевыми витками.

Модуль итогового векторного потенциала проводника круглой формы

$$A_{\odot}(r, z, j) = \int_{-r_{\text{пров}}}^{r_{\text{пров}}} \int_{-\sqrt{r_{\text{пров}}^2 - x^2}}^{\sqrt{r_{\text{пров}}^2 - x^2}} \frac{\mu}{4\pi} \cdot \frac{j(x, y) \cdot dx \cdot dy \cdot (R + x)}{\sqrt{(z - y)^2 + (R + x)^2 + r^2}} \cdot \int_0^{2\pi} \frac{\cos \Psi \cdot d\Psi}{\sqrt{1 - \frac{2 \cdot (R - x) \cdot r \cdot \cos \Psi}{(z - y)^2 + (R - x)^2 + r^2}}}, \quad (2.25)$$

где параметры бесконечно тонкого витка изображены на рисунке 2.13.

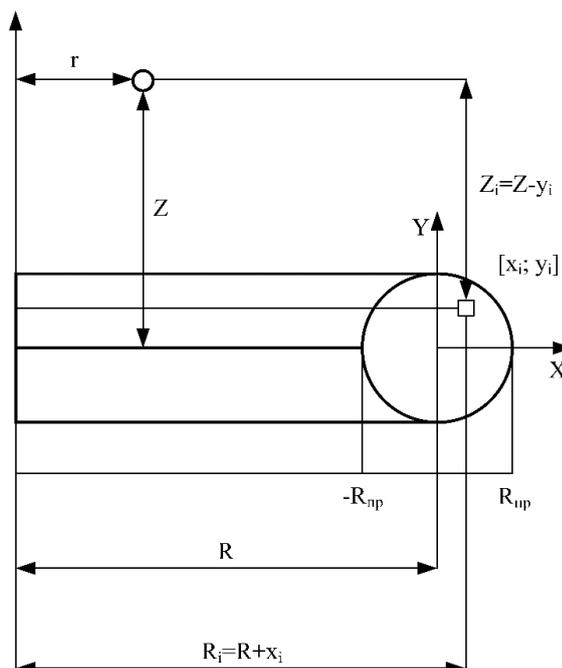


Рис. 2.13. К определению векторного потенциала проводника круглой формы

Для провода прямоугольной формы:

$$A_{\square}(r, z, j) = \int_{\frac{\text{ширина}}{2}}^{\frac{\text{ширина}}{2}} \int_{\frac{\text{высота}}{2}}^{\frac{\text{высота}}{2}} \frac{\mu}{4\pi} \cdot \frac{j(x, y) \cdot dx \cdot dy \cdot (R + x)}{\sqrt{(z - y)^2 + (R + x)^2 + r^2}} \cdot \int_0^{2\pi} \frac{\cos \Psi \cdot d\Psi}{\sqrt{1 - \frac{2 \cdot (R - x) \cdot r \cdot \cos \Psi}{(z - y)^2 + (R - x)^2 + r^2}}}, \quad (2.26)$$

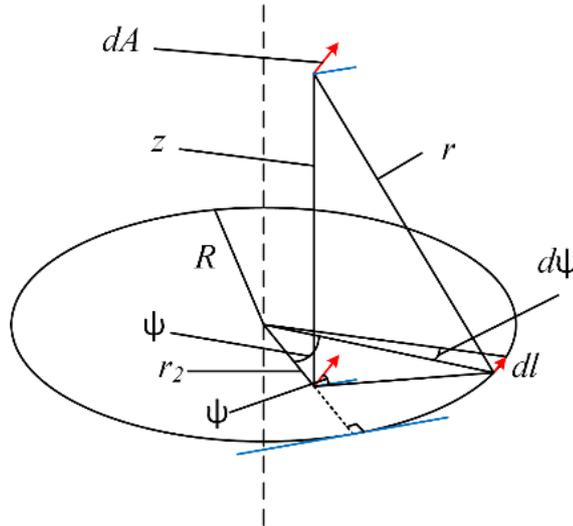


Рис. 2.14. К определению параметров для бесконечно тонкого кольцевого витка

Поток, пронизывающий отдельное кольцо, рассчитывается, как среднее между потоком, проходящим через внутреннее сечение витка, и потоком, проходящим через внешнее сечение. Поток в отдельном витке по принципу суперпозиции создается всеми витками катушки, включая сам этот виток.

В [17] показано, что для удобства расчетов можно пренебречь определенной формой сечения проводника без потери точности расчета. Для этого необходимо приблизить исходный проводник проводником круглой формы с таким же значением площади сечения. Применяя формулу для векторного магнитного потенциала, созданного бесконечно тонким кольцевым витком, можно получить формулу для собственной индуктивности катушки:

$$L = \frac{1}{2I} \sum_{i=0}^{w-1} \left[ \sum_{k=0}^{w-1} A(R_2, i \cdot D_{\text{пр}} - k \cdot D_{\text{пр}}) \cdot 2\pi R_2 \right] + \frac{1}{2I} \sum_{i=0}^{w-1} \left[ \sum_{k=0}^{w-1} A(R_1, i \cdot D_{\text{пр}} - k \cdot D_{\text{пр}}) \cdot 2\pi R_1 \right], \quad (2.27)$$

где  $R_1$ ,  $R_2$  – внутренний и внешний радиусы витка;  $D_{\text{пр}}$  – диаметр провода.

Также можно определить взаимную индуктивность двух витков и двух катушек, причем как расположенных на одной оси, так и несоосных.

Величина взаимной индуктивности двух катушек есть отношение потокоцепления, созданного в одной катушке другой катушкой с током. Магнитный поток отдельного витка можно рассчитать, используя принцип суперпозиции – поток отдельного витка равен сумме потоков, которые создаются отдельными кольцевыми витками катушки с током. Магнитный поток витка рассчитывается как среднее между потоком, проходящим через внутреннее сечение витка, и потоком, проходящим через внешнее сечение витка.

$$M = \frac{1}{2I} \sum_i \sum_j (\Phi_{\text{внутр}} + \Phi_{\text{внешн}}). \quad (2.28)$$

Величина магнитного потока также определяется по (2.25). При этом независимой переменной в расчете выступает угол  $\beta$  (рис. 2.15), от которого зависит значение элементарного скалярного произведения векторного потенциала и элемента длины витка. Зависимость этого скалярного произведения от угла  $\beta$  можно представить в виде

$$\vec{A} \cdot d\vec{l} = A(R', z) \cdot dl \cdot \cos(\beta - \alpha), \quad (2.29)$$

$$\text{где } \cos(\beta - \alpha) = \frac{R_a + r_a \cos \beta}{\sqrt{r_a^2 + R_a^2 + 2r_a R_a \cos \beta}}, \quad (2.30)$$

$$R' = \sqrt{r_a^2 + R_a^2 + 2r_a R_a \cos \beta}, \quad (2.31)$$

$dl = R_a d\beta$  - по определению угла в радианах.

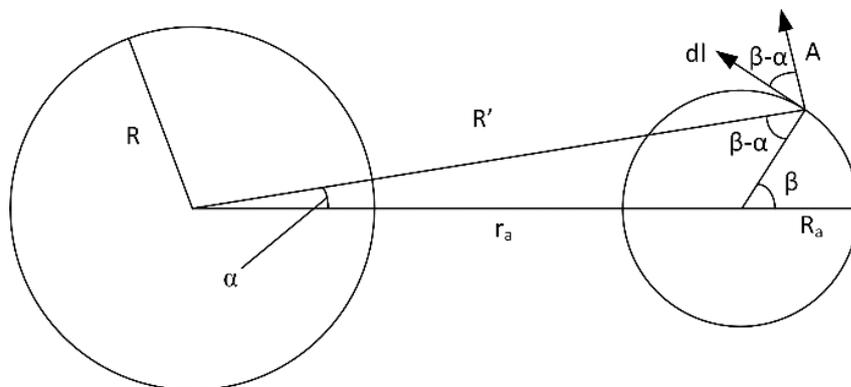


Рис. 2.15. Геометрия и обозначения, необходимые для расчета магнитного потока, созданного витком с током, через другой несоосный первому виток

Тогда элементарное скалярное произведение (2.29) примет вид

$$\vec{A} \cdot d\vec{l} = A(R', z) \cdot \frac{(R_a + r_a \cos \beta) R_a d\beta}{\sqrt{r_a^2 + R_a^2 + 2r_a R_a \cos \beta}}. \quad (2.32)$$

Суммируя элементарные скалярные произведения при малом изменении угла  $\beta$  от 0 до  $2\pi$ , получим значение магнитного потока. Данная математическая операция совпадает с определенным интегралом по  $\beta$ . Получим выражение для магнитного потока:

$$\Phi(R_a, z) = \int_0^{2\pi} \frac{(R_a + r_a \cos \beta) R_a d\beta}{\sqrt{r_a^2 + R_a^2 + 2r_a R_a \cos \beta}} \cdot A\left(\sqrt{r_a^2 + R_a^2 + 2r_a R_a \cos(\Delta\beta \cdot n)}, z\right). \quad (2.33)$$

Тогда выражения для внутреннего и внешнего потоков:

$$\Phi_{\text{внутр}} = \Phi(R_a - R_{\text{пр}}, z), \quad \Phi_{\text{внешн}} = \Phi(R_a + R_{\text{пр}}, z), \quad (2.34)$$

где  $R_a$  – средний радиус витка второй катушки;  $R_{\text{пр}}$  – радиус провода.

Тогда (2.28) примет вид:

$$M = \frac{1}{2I} \sum_{i=0}^{w_a-1} \left[ \sum_{k=0}^{w-1} \Phi\left(R_a - \frac{D_2}{2}, i \cdot D_2 + h - k \cdot D_1\right) \right] + \frac{1}{2I} \sum_{i=0}^{w_a-1} \left[ \sum_{k=0}^{w-1} \Phi\left(R_a + \frac{D_2}{2}, i \cdot D_2 + h - k \cdot D_1\right) \right], \quad (2.35)$$

где  $D_1$  – диаметр проводника первой катушки;  $D_2$  – диаметр проводника второй катушки (потокосцепление этой катушки и рассчитывается);  $w_a$  – число витков второй катушки;  $w$  – число витков первой катушки;  $I$  – ток первой катушки;  $R_a$  – средний радиус второй катушки;  $h$  – разница высот нижних точек катушек (если вторая катушка выше, то  $h$  – число положительное).

Расчет взаимной индуктивности соосных катушек аналогичен расчету взаимных индуктивностей несоосных катушек. Используя формулы, аналогичные расчету собственной индуктивности, можно представить внутренние и внешние потоки как

$$\Phi_{\text{внутр}} = A(R_{\text{внутр}}, z) \cdot 2\pi R_{\text{внутр}}, \quad (2.36)$$

$$\Phi_{\text{внешн}} = A(R_{\text{внешн}}, z) \cdot 2\pi R_{\text{внешн}}. \quad (2.37)$$

Тогда векторный магнитный потенциал будет определяться как

$$A(r, z) = \frac{\mu}{4\pi} IR \int_0^{2\pi} \frac{\cos \Psi \cdot d\Psi}{\sqrt{z^2 + R^2 + r^2} \sqrt{1 - \frac{2 \cdot R \cdot r \cdot \cos \Psi}{z^2 + R^2 + r^2}}}, \quad (2.38)$$

где  $r$  – расстояние от точки, в которой вычисляется потенциал, до оси витка;  $z$  – высота рассматриваемой точки относительно плоскости витка.

Тогда взаимная индуктивность двух соосных катушек

$$M = \frac{1}{2I} \sum_{i=0}^{w_a-1} \left[ \sum_{k=0}^{w-1} A(R_2, i \cdot D_2 + h - k \cdot D_1) 2\pi R_2 \right] + \frac{1}{2I} \sum_{i=0}^{w_a-1} \left[ \sum_{k=0}^{w-1} A(R_1, i \cdot D_2 + h - k \cdot D_1) 2\pi R_1 \right], \quad (2.39)$$

где  $R_1$  – внутренний радиус витка, через который рассчитывается магнитный поток (вторая по номеру);  $R_2$  – внешний радиус витка;  $D_1$  – диаметр проводника первой катушки;  $D_2$  – диаметр проводника второй катушки;  $w_a$  – число витков второй катушки;  $w$  – число витков первой катушки;  $I$  – ток первой катушки;  $h$  – разница высот нижних точек катушек (если вторая катушка выше, то  $h$  – число положительное).

### 2.1.6. Модель для расчета сопротивления поля нулевой последовательности

В [109] описаны основные особенности построения имитационных моделей СТ. К ним можно отнести небольшую величину поля вне магнитной системы, высокую степень однородности, слабовыраженное влияние дополнительных факторов (таких, как анизотропия стали магнитопровода, особенности конструкции СТ и т.п.). В этом случае уточненные модели

могут быть основаны на теории магнитных цепей [36] и представлять собой магнитную цепь вида, представленного на рис. 2.16, где  $R_{m1}$ ,  $R_{m2}$ ,  $R_{m3}$  –

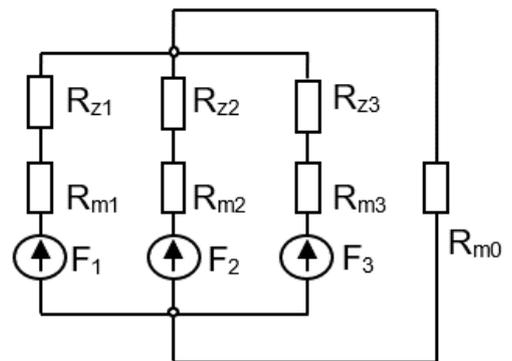


Рис. 2.16. Магнитная цепь силового трансформатора

магнитные сопротивления ветвей схемы замещения,  $R_z$  – сопротивления воздушных зазоров,  $R_{m0}$  – магнитное сопротивление потока нулевой последовательности,  $F_1, F_2, F_3$  – намагничивающие силы стержней [123].

Магнитные сопротивления рассчитываются по формулам [33]

$$R_{mk} = v(B_k) \begin{cases} \frac{\ell_s}{S_s} + \frac{2\ell_a}{S_a} \text{ при } k = 1, 3, \\ \frac{\ell_s}{S_s}, \text{ при } k = 2; \end{cases} \quad (2.40)$$

$$R_{zk} = \frac{\delta_{tz}}{2\sqrt{2} \cdot \mu_0 S_s} \quad (2.41)$$

где  $v(B)$  – кривая намагничивания электротехнической стали в направлении проката стали в форме зависимости удельного магнитного сопротивления стали от индукции;  $\ell_s$  – длина средней линии стержня до линий стыка;  $\ell_a$  – длина средней линии половины ярма до линий стыка;  $S_s, S_a$  – соответственно активное сечение стержня и ярма;  $\delta_{tz}$  – расчетное значение технологического зазора между стержнем и ярмом.

Магнитное сопротивление нулевой последовательности не представляется возможным определить по аналогичной формуле, т.к. не известна длина средней силовой линии для потока вне магнитной системы, замыкающегося по воздуху. В данном случае возможно использовать модель, представленную на рис. 2.17, в которой ток задан только в первичной обмотке. Тогда искомое сопротивление определится как

$$R_{m0} = \frac{F_\Sigma}{\Phi_{\Sigma 0}} = \frac{2I_1 w_1}{\Phi_{\Sigma 0}}, \quad (2.42)$$

где  $\Phi_{\Sigma 0}$  – магнитный поток, найденный из полевой модели.

Используя полученные данные, можно построить уточненную математическую модель СТ для имитации различных режимов работы.

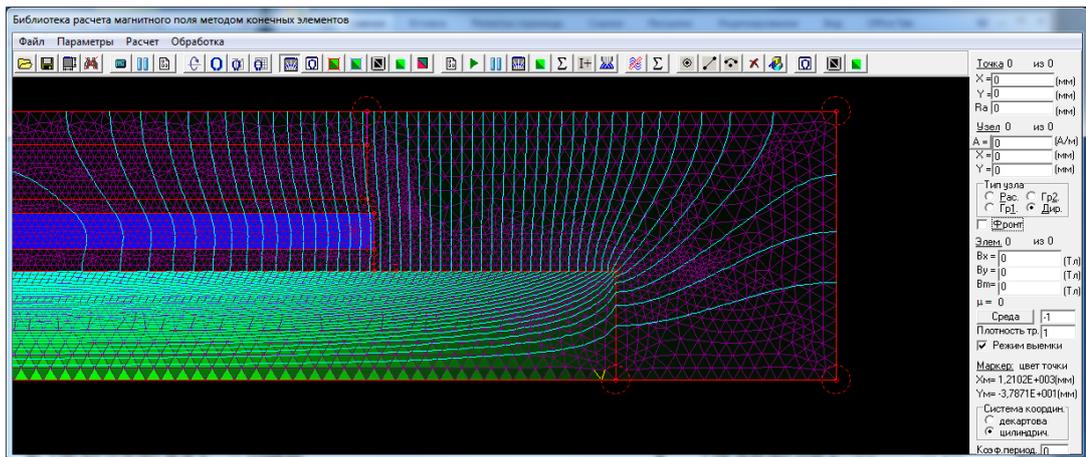


Рис. 2.17. Модель для определения магнитного сопротивления поля нулевой последовательности

## 2.2. Разработка имитационных моделей силовых трансформаторов с учетом взаимного влияния полей за пределами магнитопровода

### 2.2.1. Разработка модели переходных режимов работы СТ с учетом взаимного влияния полей за пределами магнитопровода

В качестве основы имитационной модели для расчета переходных режимов была взята модель, описанная в [103]. Эта модель построена с использованием MATLAB Simulink SimPowerSystems на основе модели идеального трансформатора (рис. 2.18, а). В данную модель была добавлена ветвь намагничивания, а также элементы, учитывающие активные сопротивления обмоток и индуктивности обмоток от полей за пределами магнитопровода (рис. 2.18, б).

Величины индуктивностей обмоток по полям вне магнитной системы определяются по методике, предполагающей решение полевой задачи, имитирующей опыт КЗ трансформатора, описанной выше.

Достоинством данной модели является возможность моделирования СТ с любой подключаемой нагрузкой в симметричных установившихся режимах. Тестовые расчеты для режима холостого хода показали совпадение расчетных кривых для холостого хода с опытными [103].

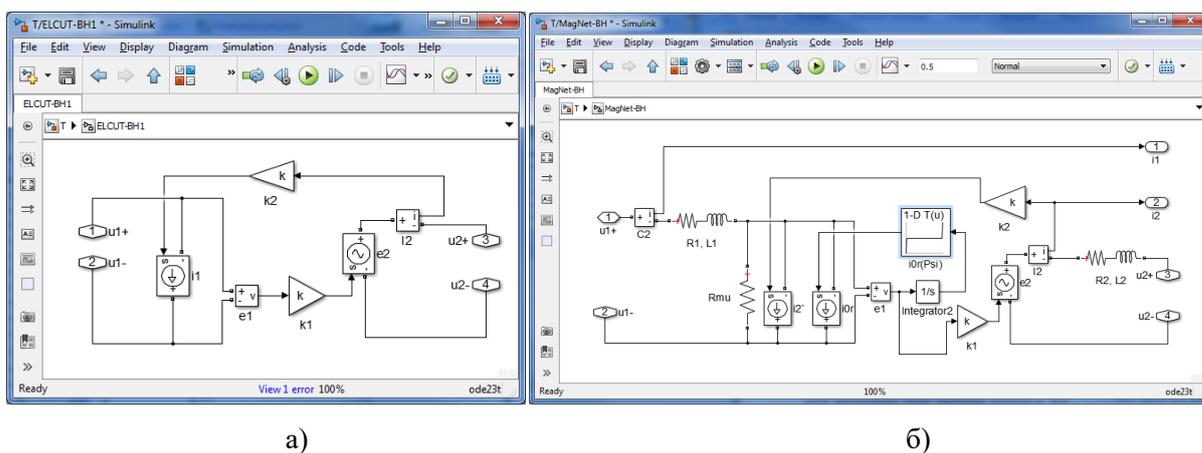


Рис. 2.18. Модель идеального (а) и реального (б) однофазного трансформатора

Данная модель может быть расширена до трехфазного двухобмоточного [87, 108] и трехфазного трехобмоточного [89, 92] трансформатора (рис. П5.1 и П5.2). Особенность данных моделей состоит в отсутствии взаимного влияния обмоток по полям вне магнитной системы. Это является их большим недостатком.

Для учета взаимного влияния потоков обмоток вне магнитной системы необходимо использовать матрицы (2.17) и (2.18). Рассмотрим, каким образом это можно реализовать при моделировании трансформатора с использованием стандартной библиотеки MATLAB Simulink SimPowerSystems.

При моделировании цепей с индуктивностью с использованием библиотеки MATLAB Simulink SimPowerSystems обычно используется линейный элемент RLC Branch (рис. 2.19,а) [117].

В то же время для моделирования индуктивности можно использовать электрическую схему замещения на основе управляемого источника тока Controlled Current Source (рис. 2.19, б), номинал которого рассчитывается на каждом шаге интегрирования по времени по формуле

$$I = \frac{1}{L} \int_0^t u(t) dt, \quad (2.43)$$

где  $L$  – величина индуктивности;  $u(t)$  – падение напряжения.

Шунтирующее сопротивление  $R_b$  с большим номиналом на рис. 2.24,б используется для устранения возможных численных конфликтов [85].

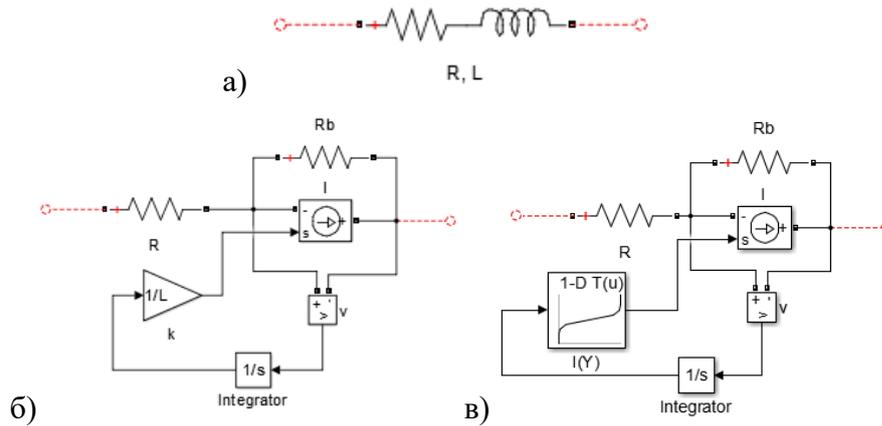


Рис. 2.19. Элемент RLC Branch библиотеки MATLAB Simulink SimPowerSystems (а) его схема замещения с использованием управляемого источника тока в линейном (б) и нелинейном (в) вариантах

Достоинством данной схемы замещения является возможность вычисления номиналов индуктивного элемента, которые могут изменяться на каждом шаге интегрирования. Например, таким образом можно смоделировать нелинейную индуктивность, заданную кривой намагничивания в форме  $I(\Psi)$ , где  $\Psi$  – потокосцепление обмотки, как это показано на рис. 2.19,в.

В нашем случае мы используем данный аппарат моделирования для имитации процессов в обмотках трансформаторов, вызванных полями вне магнитной системы с учетом взаимных индуктивностей (рис. 2.20) [107].

В частности, в двухобмоточном трансформаторе индуктивная связь по полям вне магнитной системы каждой пары фазных обмоток может быть смоделирована схемой, представленной на рис. 2.20,а. Аналогичная схема для трехобмоточного трансформатора представлена на рис. 2.20, б.

Данные схемы призваны дополнить модели, изображенные на рис. П5.1 и П5.2. Расчет номиналов источников тока в этих моделях осуществляется с использованием обращенных матриц индуктивностей

$$[M] = [L_{\sigma}]^{-1}, \quad (2.44)$$

где  $[L_{\sigma}]$  – матрицы индуктивностей, сформированные для двухобмоточных и трехобмоточных трансформаторов соответственно по (2.17) и (2.18). Данные матрицы имеют соответственно размер  $2 \times 2$  и  $3 \times 3$ .

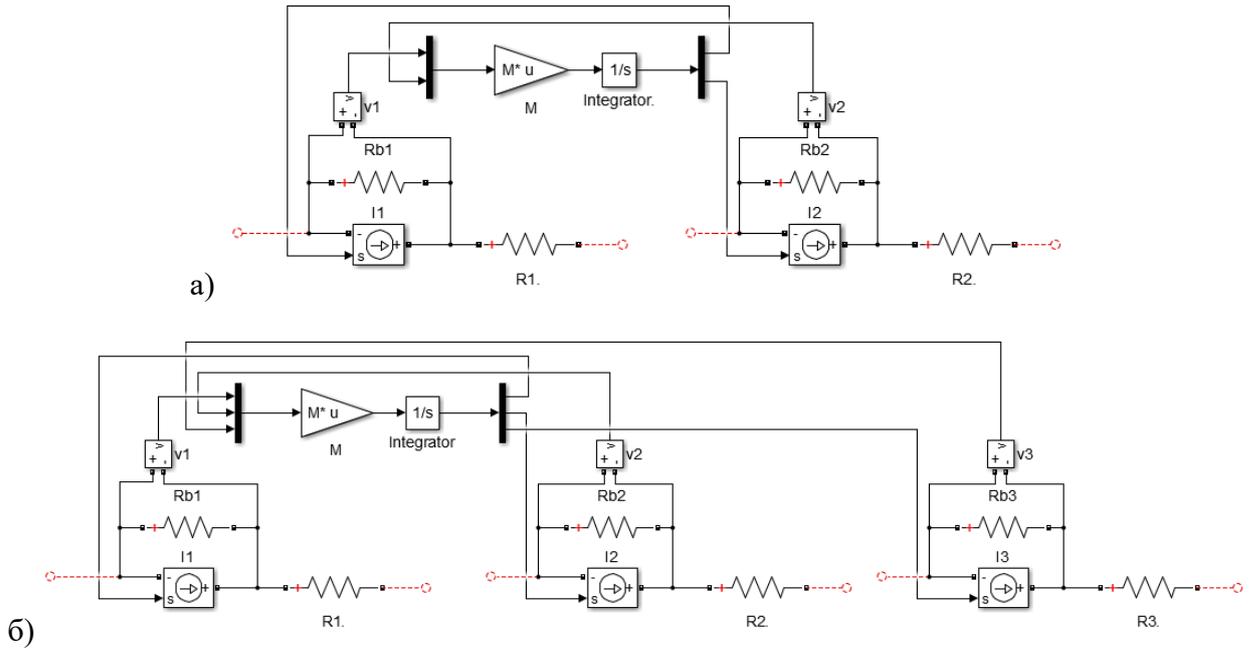


Рис. 2.20. Модель индуктивной связи по полям рассеяния первичной и вторичной обмоток одной фазы двухобмоточного (а) и трехобмоточного (б) трансформатора с использованием матрицы индуктивностей

Имитационная модель трехфазного двухобмоточного трансформатора с учетом матриц взаимных индуктивностей представлена на рис. 2.21. Аналогичная схема трехобмоточного трансформатора представлена на рис. 2.22.

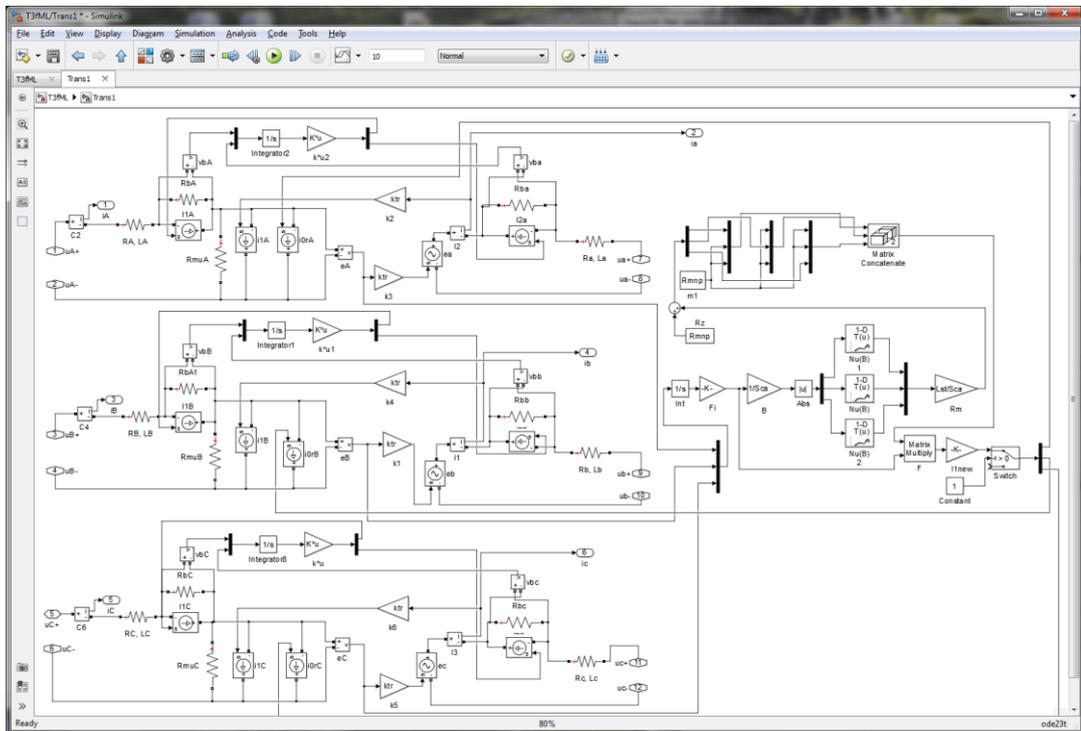


Рис. 2.21. Имитационная модель трехфазного двухобмоточного трансформатора с учетом взаимного влияния потоков рассеяния в MATLAB Simulink SimPowerSystems

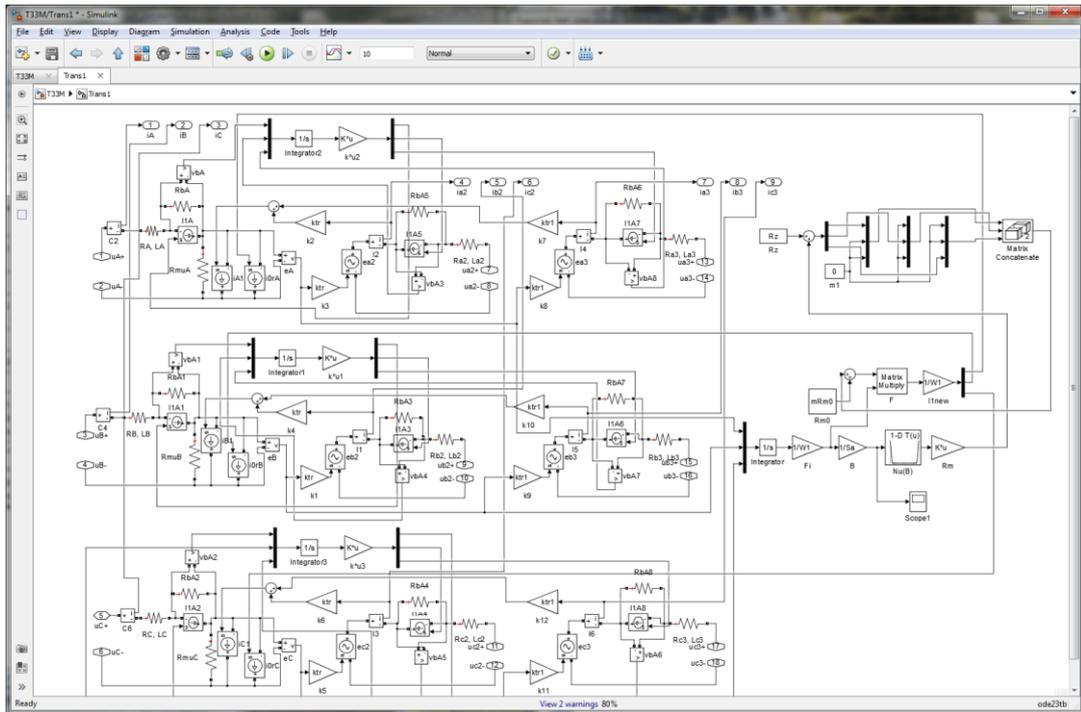


Рис. 2.22. Имитационная модель трехфазного трехобмоточного трансформатора с учетом взаимного влияния потоков рассеяния в MATLAB Simulink SimPowerSystems

Помимо матриц индуктивностей в данных моделях присутствуют элементы с уточненными (см. раздел 2.1) значениями активных сопротивлений обмоток и магнитных сопротивлений нулевой последовательности (блоки  $R_{mp}$  на рис. 2.21 и  $R_{m0}$  на рис. 2.22).

В отличие от моделей, приведенных в приложении П5, данные имитационные модели позволяют правильно отразить физику процессов, происходящих в трансформаторе при различной комбинации токов в разных обмотках. В настоящее время подобные модели строятся лишь на основе расчетов нестационарного магнитного поля в рамках сложных САЕ-систем.

Аналогичных моделей, функционирующих на основе теории цепей, не существует. Так как при расчете параметров КЗ трансформатора используются модели магнитного поля рассеяния, а точность, достигаемая при моделировании магнитопровода в цепной постановке, не уступает точности полевых моделей, то можно утверждать, что точность разработанных имитационных модели не ниже точности сложных и медленных полевых моделей [107].

### 2.2.2. Разработка модели для расчета симметричных и несимметричных установившихся режимов СТ с учетом комплексной магнитной проницаемости

Описанная выше модель позволяет рассчитывать динамические режимы работы СТ. При анализе установившихся симметричных и несимметричных режимов работы СТ возможно использование символического метода.

В силовых трансформаторах при синусоидальных источниках электрической энергии вследствие нелинейности кривых намагничивания сталей и явления гистерезиса токи и потокосцепления ветвей в общем

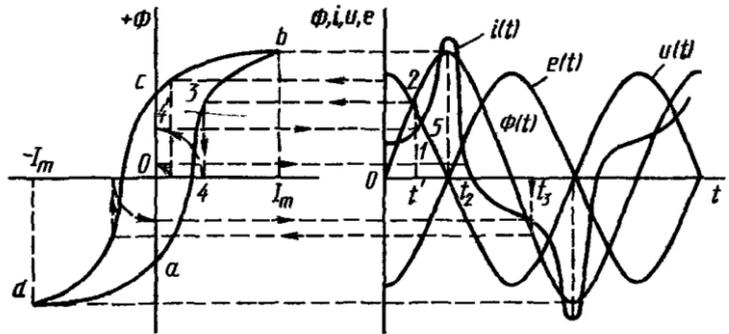


Рис. 2.23. Иллюстрация нелинейности кривой тока при учете петли гистерезиса

случае несинусоидальны (рис. 2.23). В большинстве случаев это искажение не слишком велико, поэтому при расчетах кривые часто заменяют эквивалентными синусоидами. Такой подход позволяет упростить вычисления и дает достаточную точность при расчете статических характеристик СТ.

При переменных полях зависимость  $B(H)$  определяется динамической петлей, которая представляет собой нечто промежуточное между эллипсом и гистерезисной петлей. При этом форма  $B(H)$  меняется с изменением частоты, приближаясь при уменьшении частоты к петле гистерезиса, а при увеличении частоты – к эллипсу вследствие развития вихревых токов [36].

Как показано в [36], токи и потокосцепления ветвей СТ, содержащих ферромагнитные сердечники, будут синусоидальными, если реальную динамическую петлю  $B(H)$  заменить эллипсом (рис. 2.24). При этом площадь эллипса, равная потерям энергии в единице объема ферромагнетика за один период перемагничивания, берется одинаковой с площадью истинной кривой  $B(H)$ . Так

же действующее значение синусоидального тока также должно быть равно действующему значению несинусоидального тока.

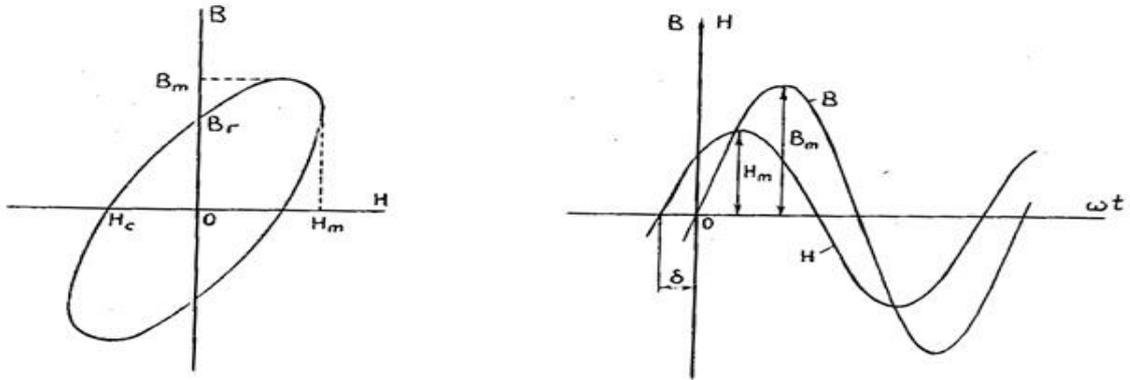


Рис. 2.24. Замена динамической петли  $B(H)$  эквивалентными синусоидами

Замена реальной кривой тока эквивалентной синусоидой позволяет при расчете использовать символический метод, предполагающий введение комплексных чисел.

Мощность потерь в стали в единице объема в этом случае [119]

$$P_0 = 0,5\omega H_m B_m \sin \delta \quad (2.45)$$

где  $H_m$ ,  $B_m$  – амплитуды эквивалентных синусоидальных кривых напряженности и индукции магнитного поля.

Замена реальных кривых  $H(t)$  и  $B(t)$  эквивалентными синусоидальными позволяет представить их комплексными амплитудами  $\underline{H}_m$  и  $\underline{B}_m$ , которые связаны соотношением

$$\underline{B}_m = \mu_0 \underline{\mu}_r \underline{H}_m \quad (2.46)$$

где  $\underline{\mu}_r = \mu_r e^{-j\delta}$  – комплексная относительная магнитная проницаемость [11].

Величина  $\underline{\mu}_r$  зависит от амплитуды индукции магнитного поля и может быть определена по формуле [36]

$$\underline{\mu}_r = \frac{\pi \cdot f \cdot B_m^2}{\mu_0 (Q_0 + jP_0) d_c}, \quad (2.47)$$

где  $Q_0$  – удельная намагничивающая мощность;  $P_0$  – удельные потери в стали, обусловленные вихревыми токами и гистерезисом;  $d_c$  – плотность стали (отношение массы стали к ее объему).

Так как величины  $B$  и  $H$  для магнитной цепи СТ принимаются синусоидальными, то для их мгновенных значений цепь предполагается линейной. Но между комплексными амплитудами  $\underline{H}_m$  и  $\underline{B}_m$  зависимость будет нелинейной. При этом значение этих величин в различных частях магнитопровода заранее не известны и зависят от режима работы устройства. Как показывает анализ, с ростом индукции  $B_m$  модуль  $\mu_r$  и аргумент  $\delta$  комплексной магнитной проницаемости электротехнических сталей плавно уменьшаются [11].

Имея основные характеристики стали (зависимости удельных потерь от индукции в стали), получим зависимости  $\mu_r(B_m)$  и  $\delta(B_m)$ . Заменяем плавно изменяющиеся при изменении  $B_m$  значения  $\mu_r$  и  $\delta$  отрезками прямых. То есть будем считать, что при изменении  $B_m$  в пределах  $k$ -го отрезка  $B_{mk} < B_m < B_{mk+1}$  комплексная относительная магнитная проницаемость  $\underline{\mu}_r$  остается неизменной, принимая некоторое усредненное значение. Тогда для комплексных амплитуд  $\underline{B}_m$  и  $\underline{H}_m$  уравнение (2.46) примет вид

$$\underline{B}_m = \mu_0 \underline{\mu}_r(\sigma_k) \underline{H}_m, \quad (2.48)$$

где  $\underline{\mu}_r(\sigma_k)$  – комплексная относительная магнитная проницаемость, значение которой определяется номером отрезка  $\sigma_k$ .

Для комплексных амплитуд магнитного потока  $\underline{\Phi}_{mk}$  и магнитного напряжения  $\underline{U}_{mk}$   $k$ -й ветви в общем случае с учетом (2.48) получим [61]:

$$\underline{\Phi}_{mk} = \Lambda_k(\sigma_k) \underline{U}_{mk} + \Lambda_k(\sigma_k) \underline{E}_{mk}, \quad (2.49)$$

где  $\underline{E}_{mk}$  – комплексная амплитуда МДС  $k$ -й ветви магнитной цепи трансформатора;  $\Lambda_k(\sigma_k)$  – комплексная магнитная проводимость  $k$ -й ветви магнитной цепи.

При этом

$$\Lambda_k(\sigma_k) = \mu_0 \underline{\mu}_r(\sigma_k) \frac{S_k}{l_k}, \quad (2.50)$$

где  $l_k$  – длина, а  $S_k$  – площадь элементарного объема, из которых состоит магнитная цепь и в которых векторы индукции  $\vec{B}$  и напряженности  $\vec{H}$  магнитного поля принимают усредненные значения.

Обозначим через  $n$  число ветвей схемы замещения магнитной цепи трансформатора и введем следующие обозначения:  $[\Phi_m]$  – матрица-столбец комплексных амплитуд магнитных потоков всех ветвей, определяемая как

$$[\Phi_m] = [\Phi_{m1} \ \Phi_{m2} \dots \Phi_{mk} \dots \Phi_{mn}]^t; \quad (2.51)$$

$[U_m]$  – матрица-столбец комплексных амплитуд магнитных напряжений на ветвях магнитной цепи, определяемая как

$$[U_m] = [U_{m1} \ U_{m2} \dots U_{mk} \dots U_{mn}]^t; \quad (2.52)$$

$[F_m]$  – матрица-столбец комплексных амплитуд источников МДС всех ветвей, определяемая как

$$[F_m] = [F_{m1} \ F_{m2} \dots F_{mk} \dots F_{mn}]^t. \quad (2.53)$$

С учетом принятых обозначений, уравнение (2.49) можно записать для всех ветвей в матричной форме

$$[\Phi_m] = [\Lambda(\sigma)][U_m] + [\Lambda(\sigma)][F_m], \quad (2.54)$$

где  $[\Lambda(\sigma)]$  – диагональная матрица комплексных магнитных проводимостей ветвей магнитной цепи, элементы которой, соответствующие  $k$ -й нелинейной ветви, определяются номером отрезка  $\sigma_k$  как

$$[\Lambda(\sigma)] = \text{diag}[\Lambda_1(\sigma_1) \ \Lambda_2(\sigma_2) \ \dots \Lambda_k(\sigma_k) \dots \Lambda_n(\sigma_n)]. \quad (2.55)$$

Комплексные амплитуды МДС ветвей схемы замещения магнитной цепи СТ  $[F_m]$ , обусловленные комплексными токами ветвей электрической цепи СТ  $[I]$ , могут быть выражены через значения этих токов с помощью сингулярной матрицы преобразования  $[C]$  [64] как

$$[F_m] = \sqrt{2}[C][I]. \quad (2.56)$$

Как известно из [52], структура матрицы  $[C]$  связана с электрической и магнитной схемами замещения трансформатора: число столбцов равно числу ветвей электрической цепи, число строк равно числу ветвей схемы замещения магнитной цепи трансформатора. Элементом этой матрицы, расположенном в  $k$ -й строке и  $j$ -м столбце является число  $w_k$ , равное количеству витков с током  $j$ -й ветви электрической цепи  $I_j$ , охватывающих  $k$ -ю ветвь схемы замещения

магнитной цепи. При этом, если МДС в  $k$ -й ветви, создаваемые числом витков с током  $I_j$ , совпадают с выбранным положительным направлением магнитного потока, то  $w_k$  берется со знаком плюс. В противном случае число  $w_k$  берется со знаком минус [60].

Для схемы замещения магнитной цепи трансформатора, приведенной на рис. 2.16, матрицы  $[\Phi_m]$ ,  $[C]$  и  $[I]$  будут иметь следующую структуру:

$$[\Phi_m] = \begin{bmatrix} \Phi_{mA} \\ \Phi_{mB} \\ \Phi_{mC} \\ \Phi_{mN} \end{bmatrix}; \quad [C] = \begin{bmatrix} w_A & 0 & 0 & -w_a & 0 & 0 \\ 0 & w_B & 0 & 0 & -w_b & 0 \\ 0 & 0 & w_C & 0 & 0 & -w_c \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad (2.57)$$

$$[I] = [I_A \quad I_B \quad I_C \quad I_a \quad I_b \quad I_c]^T.$$

Здесь  $w_A$  – число витков фазы А обмотки высшего напряжения трансформатора;  $w_a$  – витков фазы А обмотки низшего напряжения

Представление магнитной цепи СТ для любого момента времени схемой замещения в виде дискретных линейных и нелинейных комплексных проводимостей и источников МДС позволяет от локальных значений векторов напряженности и индукции магнитного поля перейти к интегральным скалярным значениям потока и магнитного напряжения участков магнитной цепи. Это дает возможность применить к анализу поля методы теории линейных и нелинейных цепей синусоидального тока.

Комплексные амплитуды потокосцеплений ветвей СТ  $[\Psi_m]$  могут быть выражены через потоки ветвей схемы замещения магнитной цепи [64] как

$$[\Psi_m] = [C]^T [\Phi_m] + [L_\sigma][I], \quad (2.58)$$

где элементами матрицы  $[L_\sigma]$  являются линейные само- и взаимоиנדуктивности ветвей СТ, определяемые по (2.17) – (2.18).

С учетом (2.54), (2.56) выражение (2.58) можно записать в виде

$$\begin{aligned} [\Psi_m] &= [C]^T [\Lambda(\sigma)][U_m] + \sqrt{2} \left( [C]^T [\Lambda(\sigma)][C] + [L_\sigma] \right) [I] = \\ &= \sqrt{2} [L(\sigma)][I] + [C]^T [\Lambda(\sigma)][U_m], \end{aligned} \quad (2.59)$$

$$\text{где } [L(\sigma)] = ([C]^T [\Lambda(\sigma)] [C] + [L_\sigma]). \quad (2.60)$$

Комплексные напряжения ветвей СТ  $[U_E]$ , обусловленные ЭДС само- и взаимоиндукции как главного поля, так и полей вне магнитной системы, могут быть выражены через комплексные амплитуды потокоцеплений  $[\Psi_m]$  [65]:

$$[U_E] = \frac{j\omega}{\sqrt{2}} [\Psi_m] = j\omega [L(\sigma)] [I] + \frac{j\omega}{\sqrt{2}} [C]^T [\Lambda(\sigma)] [U_m]. \quad (2.61)$$

Выразим комплексы напряжений на ветвях магнитной цепи  $[U_m]$  через комплексные токи ветвей электрической цепи  $[I]$ . Для этого составим уравнения по первому закону Кирхгофа для схемы замещения магнитной цепи:

$$[A] [\Phi_m] = 0, \quad (2.62)$$

где  $[A]$  – редуцированная матрица инцидентий схемы замещения магнитной цепи [61].

Комплексные амплитуды магнитных напряжений на ветвях магнитной цепи  $[U_m]$  связаны с комплексными амплитудами магнитных потенциалов узлов магнитной цепи  $[\varphi_m]$  соотношением [66]

$$[U_m] = [A]^t [\varphi_m]. \quad (2.63)$$

Подставляя в (2.62) выражения (2.62), (2.54) и (2.56), получим

$$[A] [\Lambda(\sigma)] [A]^t [\varphi_m] + [A] [\Lambda(\sigma)] \sqrt{2} [C] [I] = 0. \quad (2.64)$$

Введем обозначение

$$[Y(\sigma)] = [A] [\Lambda(\sigma)] [A]^t. \quad (2.65)$$

Тогда из (2.64) с учетом (2.65) комплексные амплитуды магнитных потенциалов узлов магнитной цепи  $[\varphi_m]$  можно выразить через токи ветвей

$$[\varphi_m] = -[Y(\sigma)]^{-1} [A] [\Lambda(\sigma)] \sqrt{2} [C] [I]. \quad (2.66)$$

Подставляя в (2.61) выражение (2.63) с учетом (2.66), получим

$$[U_E] = \frac{j\omega}{\sqrt{2}} [\Psi_m] = j\omega [L(\sigma)] [I] - \frac{j\omega}{\sqrt{2}} [C]^T [\Lambda(\sigma)] [A]^t [Y(\sigma)]^{-1} [A] [\Lambda(\sigma)] \times \sqrt{2} [C] [I] = [Z_\mu(\sigma)] [I], \quad (2.67)$$

$$\text{где } [Z_{\mu}(\sigma)] = j\omega \left( [L(\sigma)] - [C]^T [\Lambda(\sigma)] [A]^t [Y(\sigma)]^{-1} [A] [\Lambda(\sigma)] [C] \right) - \quad (2.68)$$

квадратная матрица комплексных сопротивлений ветвей СТ, обусловленных переменным магнитным полем и потерями в стали.

Элементы матрицы  $[Z_{\mu}(\sigma)]$ , как и матриц  $[\Lambda(\sigma)]$ ,  $[L(\sigma)]$  и  $[Y(\sigma)]$ , соответствующие  $k$ -й нелинейной ветви магнитной цепи, определяются номером отрезка  $\sigma_k$  аппроксимированной характеристики  $\underline{\mu}_r(B_m)$  или с учетом (2.49), (2.50)  $\Lambda_k(\Phi_{mk})$ . Для всех  $m$  нелинейных ветвей схемы замещения магнитной цепи будем иметь комбинацию отрезков [64]. Обозначим через  $[\sigma]$  одну из таких комбинаций

$$[\sigma] = \{ \sigma_1 \sigma_2 \dots \sigma_k \dots \sigma_m \}, \quad (2.69)$$

то есть  $[\sigma]$  – такой набор отрезков, когда  $\sigma_k$  ( $k = 1, \dots, m$ ) берется для  $k$ -й нелинейной ветви магнитной цепи.

Если активные сопротивления всех ветвей ЭМУ свести в диагональную матрицу  $[R]$ , то уравнение связи между комплексными напряжениями  $[U]$  и токами ветвей  $[I]$  СТ примет вид

$$[U] = ([R] + [Z_{\mu}(\sigma)]) [I] = [Z(\sigma)] [I], \quad (2.70)$$

где  $[Z(\sigma)] = [R] + [Z_{\mu}(\sigma)]$  – матрица комплексных сопротивлений ветвей СТ, элементы которых определяются комбинацией отрезков  $[\sigma]$ .

Если комбинация отрезков  $[\sigma]$  задана, то можно считать известными все элементы матрицы  $[Z(\sigma)]$ . Естественно, что комбинация отрезков  $[\sigma]$  зависит от амплитуд индукций (поточков) схемы замещения магнитной цепи и до их определения является неизвестной [91].

При известных значениях комплексных напряжений  $[U]$ , приложенных к ветвям СТ, перепишем уравнение (2.70) в другой форме

$$f[I] = [Z(\sigma)] [I] - [U] = 0 \quad (2.71)$$

и решим его кусочно-линейным методом Ньютона-Рафсона [61].

Данный метод является методом последовательных приближений: на начальном этапе необходимо задаться начальным приближением неизвестных величин, а затем уточнять их значения на каждой итерации. Преимуществом метода Ньютона-Рафсона является квадратичная скорость сходимости.

Возьмем в качестве начального приближения значения комплексных токов ветвей  $[I^{(0)}]$ . Им соответствуют начальные значения амплитуд магнитных потоков  $[\Phi_m^{(0)}]$ , начальная комбинация отрезков  $[\sigma^{(0)}]$  и начальное значение матрицы  $Z(\sigma^{(0)})$  [66]. Первая итерация по методу Ньютона-Рафсона имеет вид

$$[I^{(1)}] = [I^{(0)}] - [Z(\sigma^{(0)})]^{-1} [Z(\sigma^{(0)})][I^{(0)}] + [Z(\sigma^{(0)})]^{-1} [U]. \quad (2.72)$$

Упростив равенство (2.72), получаем формулу

$$[I^{(1)}] = [Z(\sigma^{(0)})]^{-1} [U]. \quad (2.73)$$

Определив токи  $[I^{(1)}]$ , можно с учетом (2.54), (2.56), (2.63) и (2.66) определить комплексные амплитуды магнитных потоков  $[\Phi_m^{(1)}]$

$$[\Phi_m^{(1)}] = \sqrt{2} [\Lambda(\sigma^{(0)})] \left( [1] - [A]^t [Y(\sigma^{(0)})]^{-1} [A] [\Lambda(\sigma^{(0)})] \right) [C] [I^{(1)}], \quad (2.74)$$

где  $[1]$  – единичная матрица размерностью  $n \times n$ .

Модулям элементов матрицы  $[\Phi_m^{(1)}]$  будет соответствовать комбинация отрезков  $[\sigma^{(1)}]$ . Для  $k$ -й итерации в соответствии с (2.73) комплексные токи ветвей определяются выражением

$$[I^{(k+1)}] = [Z(\sigma^{(k)})]^{-1} [U]. \quad (2.75)$$

При этом комбинация отрезков на  $(k+1)$ -й итерации  $[\sigma^{(k+1)}]$  определится из значений амплитуд магнитных потоков, определенных по формуле

$$[\Phi_m^{(k+1)}] = \sqrt{2} [\Lambda(\sigma^{(k)})] \left( [1] - [A]^t [Y(\sigma^{(k)})]^{-1} [A] [\Lambda(\sigma^{(k)})] \right) [C] [I^{(k+1)}]. \quad (2.76)$$

Итерационный процесс по (2.75) продолжается до тех пор, пока комбинация отрезков на  $(k+1)$ -й итерации  $[\sigma^{(k+1)}]$  полностью не повторит комбинацию отрезков на итерации  $k$ , т.е.  $[\sigma^{(k+1)}] = [\sigma^{(k)}]$ . В отличие от обычного метода Ньютона-Рафсона, при использовании (2.75) отпадает необходимость вычисления матрицы Якоби, а точность решения зависит только от точности

аппроксимации значений модуля  $\mu_r$  и аргумента  $\delta$  комплексной магнитной проницаемости отрезками прямых.

Алгоритм расчета представлен на рис. 2.25.

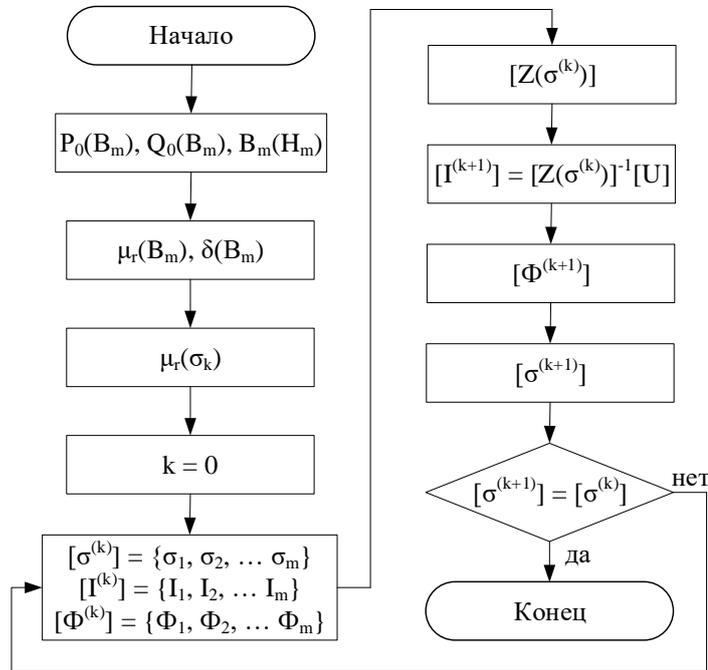


Рис. 2.25. Алгоритм расчета токов ветвей СТ с учетом параметров цепи намагничивания

### 2.2.3. Методика построения цифрового двойника СТ с учетом взаимного влияния полей вне магнитной системы

При построении ЦД, роль которого заключается в имитации режимов работы СТ, большое влияние оказывает его назначение. Возможные варианты:

1. Проектный расчет – уточнение параметров проектируемого оборудования.
2. Диагностический расчет – определение работоспособности оборудования.
3. Эксплуатационные расчеты – моделирование различных режимов работы СТ в составе ЭС в реальном времени.

Методика построения ЦД СТ с учетом взаимного влияния полей вне магнитной системы включает в себя следующие позиции:

1. Уточняем исходные данные для рассматриваемого СТ: тип, число фаз, число и схема соединения обмоток, геометрические параметры.

2. Определяем тип расчета: проектный, диагностический или эксплуатационный.

3. Для определения параметров поля вне магнитной системы строим конечно-элементную модель в соответствии с типовыми особенностями рассматриваемого трансформатора с использованием библиотеки моделирования EMLib. При построении модели используем допущения, описанные в п.2.2.

3.1. При проведении проектных расчетов достаточно определить использовать упрощенную полевую модель, имитирующую опыт КЗ, без использования матрицы индуктивностей.

3.2. При проведении диагностических расчетов определяем элементы матрицы индуктивностей.

3.3. При проведении эксплуатационных расчетов определяем элементы матрицы индуктивностей с учетом взаимной индуктивности обмоток, расположенных на разных стержнях.

4. Принимаем решение о типе рассматриваемого процесса: установившийся или переходный режим.

4.1. При расчете установившегося режима достаточно использовать модель, описанную в 2.2.2.

4.2. При расчете переходного режима используем одну из моделей, рассмотренную в 2.2.1.

4.3. Осуществляем расчет. Проводим анализ результатов. Формулируем выводы и рекомендации.

Алгоритм построения ЦД приведен на рис. 2.26.

### **2.3. Разработка методики анализа участков электрических сетей, содержащих силовые трансформаторы**

При построении математической модели анализа режимов работы участков электрических сетей основополагающую роль играет тип рассматриваемого процесса: установившийся или переходный режим.

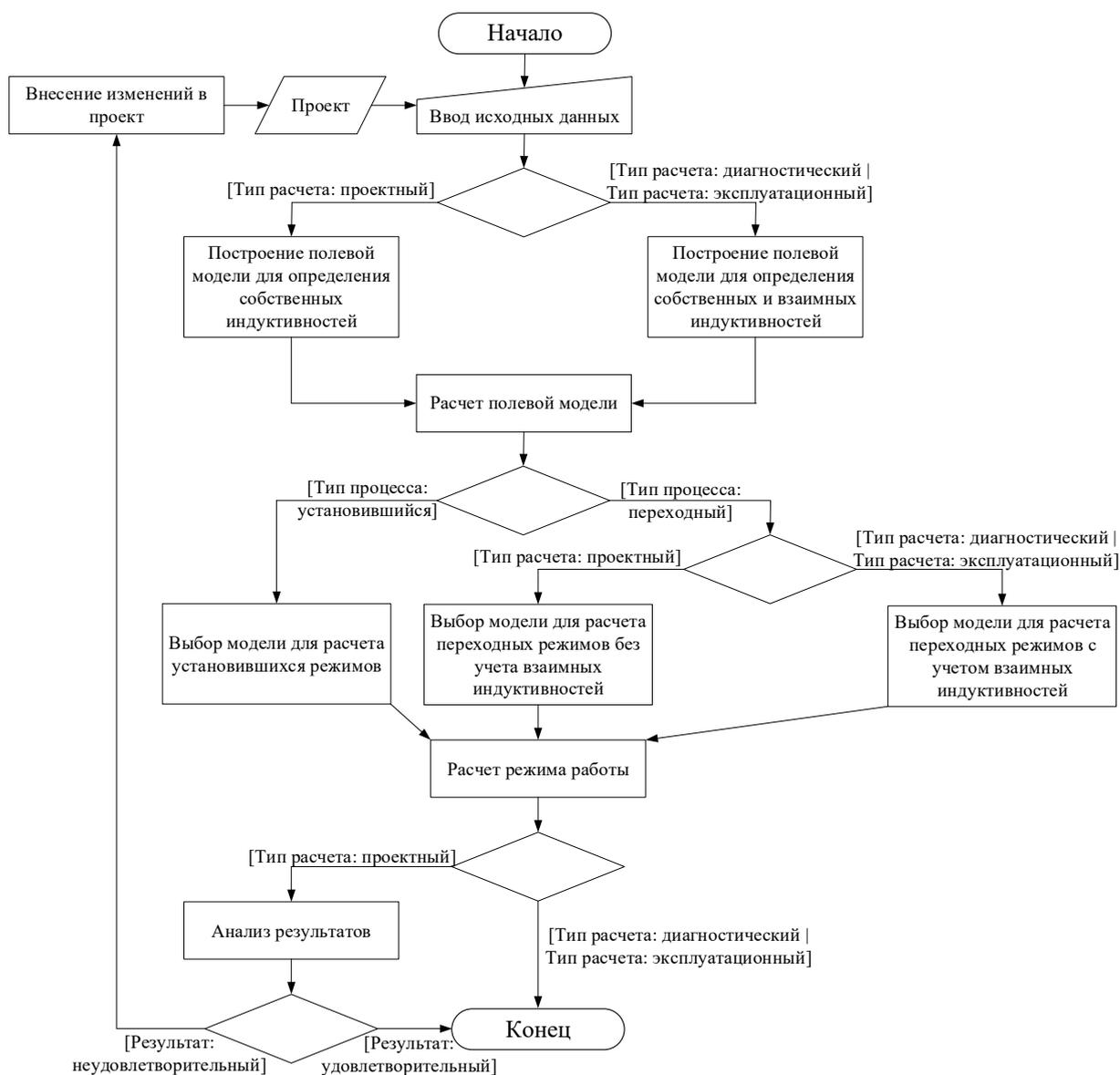


Рис. 2.26. Алгоритм построения цифрового двойника СТ

Также достаточно сильное влияние оказывает тип требуемых расчетов:

1. Проектный расчет – приближенный расчет режимов работы участка сети при его проектировании или реконструкции. Данный тип расчетов является вспомогательным и позволяет определить только приближенное распределение токов и мощностей на участке ЭС. Требуется обязательного дальнейшего уточнения аналитическим расчетом.

2. Аналитический расчет – уточненный расчет с рассмотрением режимов работы участка ЭС с целью определения возможных стационарных и нестационарных потоков мощности, в том числе и «на перспективу». Как правило, данный тип расчетов актуален на завершающем этапе проектирования

при оценке возможности эксплуатации разработанного проекта участка ЭС (в том числе с точки зрения устойчивости). К нему предъявляются повышенные требования с точки зрения точности, поскольку по результатам аналитического расчета производится окончательный выбор и проверка оборудования участка ЭС, а также настройка устройств релейной защиты и автоматики.

3. Эксплуатационный расчет – расчет в режиме реального времени (формат цифрового двойника участка ЭС). К данному типу расчетов предъявляются повышенные требования с точки зрения точности и быстродействия, поскольку результаты анализа должны быть доступны персоналу в кратчайшие сроки для анализа и оперативного реагирования на сложившиеся ситуации на участке ЭС.

Методика анализа участков ЭС, содержащих СТ содержит в себе следующие этапы:

1. Уточняем параметры элементов, входящих в состав участка СТ и их режимы работы.
2. Определяем тип расчета: проектный, аналитический или эксплуатационный.
  - 2.1. При рассмотрении проектных расчетов на начальных этапах проектирования достаточно использовать упрощенные схемы замещения СТ, приведенные в главе 1.
  - 2.2. При рассмотрении аналитических и эксплуатационных расчетов целесообразно использовать уточненные модели СТ, описанные выше и включающие в себя матрицу собственных и взаимных индуктивностей и информацию о характеристиках магнитопровода.
3. Принимаем решение о типе рассматриваемого режима: установившийся или переходный режим.
  - 3.1. При расчете установившегося режима достаточно использовать модель СТ, описанную в 2.2.2.
  - 3.2. При расчете переходного режима используем одну из моделей СТ, рассмотренную в 2.2.1.

4. Формируем математическую модель участка электрической сети с учетом необходимой информации обо всех ее элементах.

5. Осуществляем расчет. Проводим анализ результатов. Формулируем выводы и рекомендации.

Алгоритм анализа режимов работы участков электрической сети, содержащих СТ, приведен на рис. 2.27.

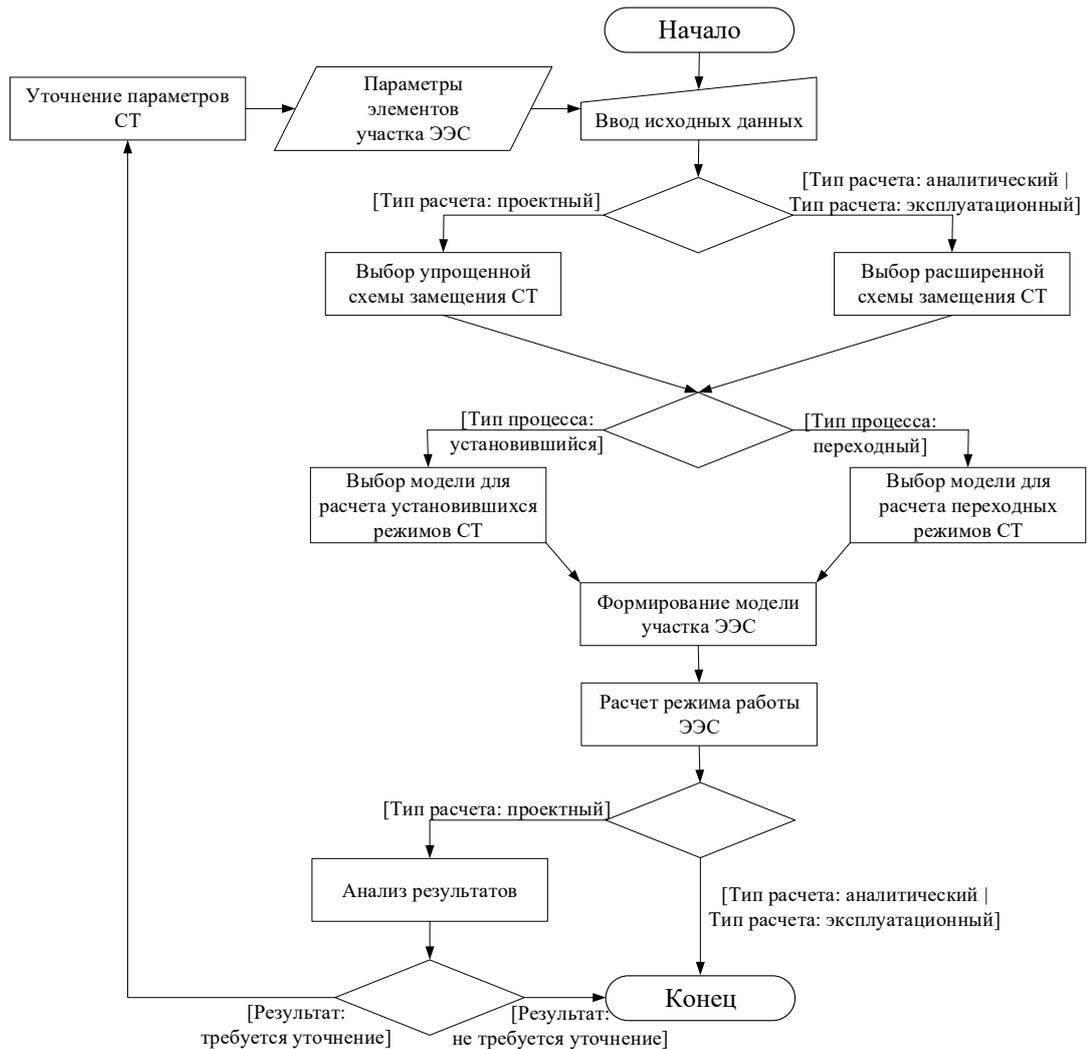


Рис. 2.27. Алгоритм анализа режимов работы участков электрической сети, содержащих силовые трансформаторы

## Выводы по второй главе

1. При сравнении двух- и трехмерных моделей расчета магнитного поля СТ выявлено, что двухмерные модели являются оптимальными с точки зрения соотношения точности и быстродействия расчета. При этом для расчета полей вне магнитной системы необходимо использовать только осесимметричную

постановку задачи. При рассмотрении задач по расчету основного потока целесообразно пренебречь учетом таких особенностей конструкции СТ, как анизотропия материала сердечника и технологические отверстия в магнитопроводе.

2. С использованием полевых моделей, построенных на вышеназванных допущениях, целесообразно производить расчет собственных индуктивностей обмоток для двухобмоточного и трехобмоточного трансформаторов, взаимных индуктивностей катушек по полям вне магнитной системы, расположенных на одном стержне (соосных), а также сопротивления поля нулевой последовательности. Взаимные индуктивности несоосных катушек возможно определить только на основе аналитического расчета магнитного поля вне магнитной системы. С использованием данной методики также можно определять собственные и взаимные индуктивности соосных катушек по полям вне магнитной системы.

3. В предложенной модели переходных режимов работы СТ учитывается взаимное влияние полей вне магнитной системы. Для этого рассчитывается матрица индуктивностей, используемая для расчета мгновенных значений управляемых источников тока, моделирующих катушки индуктивности (обмотки). Подобная модель, которая может быть использована как для двухобмоточного, так и для трехобмоточного трансформаторов, предложена впервые.

4. Разработанная модель установившихся симметричных и несимметричных (в том числе и аварийных) режимов СТ с учетом комплексной магнитной проницаемости также позволяет учесть взаимное влияние потоков обмоток вне магнитной системы. Данная модель может быть использована как при расчете УР участка ЭЭС, содержащей СТ, так и при оптимизации трансформатора в качестве компонента функции цели, чего невозможно достичь путем использования имитационных моделей, требующих интегрирования по времени.

5. Описанная методика построения ЦД СТ с учетом взаимного влияния полей вне магнитной системы может быть использована как на стадии проектирования СТ для осуществления уточненных поверочных расчетов проектируемого устройства в форме имитации различных режимов его работы в различных условиях будущей эксплуатации, так и для диагностирования неисправностей уже функционирующего трансформаторного оборудования и для превентивного анализа последствий принятия решений по управлению эксплуатируемым оборудованием электросетей.

6. Сформулированная методика анализа различных режимов работы участков электрических сетей, содержащих силовые трансформаторы, также может быть использована как на стадии проектирования энергосетей, так и на стадии их эксплуатации. Она позволяет оптимизировать режимы эксплуатации трансформаторного оборудования электросетей, прогнозируя последствия тех или иных режимов работы сети на основе уточненного моделирования СТ. Методика включает в себя разработанные математические модели, построенные с использованием собственных и взаимных индуктивностей полей вне магнитной системы.

### **3. Программная реализация и апробация разработанных имитационных моделей в составе САПР трансформаторов**

Как отмечалось, разработанные в данной диссертации модели могут быть использованы на двух стадиях жизненного цикла СТ:

- 1) стадия проектирования;
- 2) стадия эксплуатации.

На стадии проектирования разработанные модели должны использоваться для расширенного поверочного расчета вновь создаваемого устройства. Особый акцент при этом делается на задаче анализа особенностей функционирования будущего трансформатора в составе конкретной ЭС при конкретных условиях эксплуатации.

На стадии эксплуатации данные модели призваны решить две задачи:

- 1) задача диагностики оборудования путем сопоставления параметров функционирующего трансформатора с результатами исследования его цифрового двойника;
- 2) задача превентивного анализа принятия решений по управлению режимами эксплуатации оборудования ЭС.

В предыдущей главе приведены методики решения двух последних задач. Третья и четвертая главы посвящены, главным образом, разработке средств и методов решения первой задачи, напрямую связанной с использованием ЦД СТ на стадии проектирования, ориентированного на создание устройств, адаптированных к условиям работы в составе конкретной ЭС.

Перед этим необходимо решить несколько частных задач по апробации разработанных имитационных моделей на конкретных примерах. Апробация осуществлялась путем сопоставления результатов моделирования с измерениями на тестовых объектах в учебных лабораториях ИГЭУ, а также в производственных лабораториях ООО «НПК «АВТОПРИБОР» (г. Владимир), и ООО «Трансформер» (г.Подольск).

### 3.1. Апробация методики определения индуктивностей обмоток

Под опытной проверкой величин индуктивностей будем понимать сравнение паспортной величины напряжения КЗ со значением, полученным расчетным путем по величинам индуктивностей обмоток, определяемых по методике, описанной в главе 2.

В качестве объекта для исследования выбран силовой трансформатор ТМГ-1000-10/0,4 D/Ун-11, производимый ООО «Трансформер». Паспортные данные объекта приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1. Паспортные данные трансформатора

Параметры	Обмотка ВН (D)	Обмотка НН (Ун)
Мощность, кВА	1000	
Число фаз	3	
Напряжение, кВ	10±2×2,5%	0,4
Материал обмоток/тип обмоток	Al/выполнена из провода	Al/выполнена из провода
Номинальный ток (фазный), А	33,3	1443,4
Число витков обмотки (на номинальном ответвлении для ВН)	736	17
Потери ХХ (по паспорту), Вт	1894	
Потери КЗ (по паспорту), Вт	9741	
Напряжение КЗ (расчетное значение/по паспорту), %	5,37/5,49	
Ток ХХ (по паспорту), %	1,617	
Сопротивление обмоток постоянному току (расчетное значение/по паспорту), Ом: для обмотки ВН/НН (среднее значение)	1,663/1,3689	0,000701/0,000697

Для рассматриваемого силового трансформатора построена полевая модель, имитирующая опыт КЗ, по методике, описанной в главе 2. При этом были приняты расчетные данные о геометрии. По результатам решения данной полевой задачи определены индуктивности обмоток. С учетом полученных индуктивностей и расчетных данных, приведенных в таблице 3.1, Определено

значение напряжения КЗ. Расхождение с расчетной величиной составило 0,6%, что является допустимым (допустимое расхождение составляет  $\pm 5\%$ ).

Далее для этого же трансформатора полевая модель была перестроена с учетом его реальных размеров (на основании маршрутных карт составных частей), также определены индуктивности обмоток и рассчитана величина напряжения КЗ (по паспортным данным). Расхождение полученной величины с паспортным значением напряжения КЗ составило 1,8%, что также является допустимым.

Таким образом, используемые полевые модели целесообразно уточнять с учетом реальной геометрии трансформатора для повышения точности дальнейших расчетов.

Опытная проверка взаимных индуктивностей обмоток по полям вне магнитной системы невозможна, поскольку данный параметр оказывает влияние только в переходных режимах работы, что предполагает рассмотрение осциллограмм тока и напряжения при включении трансформатора. Проведение данных испытаний сопряжено с определенными трудностями и сложно реализуемо в рамках испытательной лаборатории завода.

### **3.2. Программная реализация и анализ моделей установившихся режимов работы трансформаторов**

Для апробации полученных моделей был рассмотрен трансформатор ТМГ-1000-10/0,4. По методикам, приведенным в разделе 2.1.1, определены собственные и взаимные индуктивности полей вне магнитной системы и сопротивление поля нулевой последовательности. По алгоритму, изображенному на рис. 2.25, составлена математическая модель для расчета симметричных и несимметричных установившихся режимов работы. Текст программы в среде математического пакета MATLAB для одного из режимов (режим трехфазного КЗ) приведен в приложении Пб.

Рассмотрен участок сети, включающий в себя трансформатор и нагрузку (рис. 3.1). Возможен расчет следующих режимов работы:

- 1) подключение нагрузки (симметричная и несимметричная);
- 2) симметричное (трехфазное) короткое замыкание;
- 3) несимметричное короткое замыкание.

На рис. 3.2. приведено окно ввода данных рассматриваемого трансформатора и параметры подключаемой нагрузки. Вкладки меню включают в себя выбор рассматриваемого режима работы.

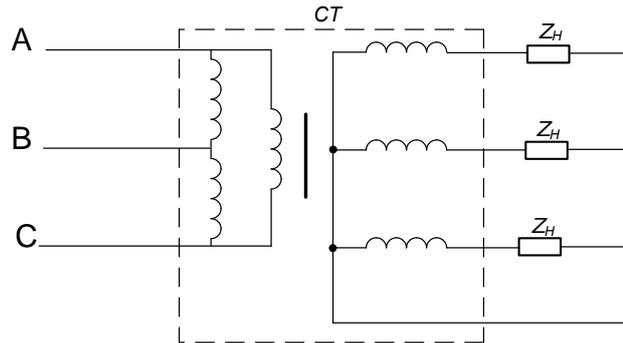


Рис. 3.1. Схема замещения рассматриваемого участка

Результатами расчета являются временные зависимости фазных первичных и вторичных токов. На рис. 3.3 приведены зависимости токов обмоток для режима трехфазного КЗ (рис. 3.3,а), однофазного КЗ фазы А (рис. 3.3,б) и режима номинальной нагрузки (рис. 3.3,в) (первичные токи увеличены в 10 раз).

При рассмотрении режима трехфазного КЗ смоделирован случай подключения к напряжению, равному паспортному значению напряжения КЗ рассматриваемого трансформатора (5,5% или 550 В). При этом получено значение тока в первичной обмотке, отличающегося от номинального тока на 2,1%. Данный результат говорит о достаточной точности применяемой модели.

Достоинством полученной модели можно назвать возможность точного учета геометрии и технологических особенностей СТ при моделировании его режимов работы. Данная модель может быть использована на стадии проектирования в качестве одного из компонентов целевой функции процедуры поиска оптимального решения трансформатора, так как позволяет получить значения токов трансформатора в виде нескольких численных значений комплексных величин, не требуя использования медленной процедуры интегрирования по времени, характерного для моделей переходных процессов [100].

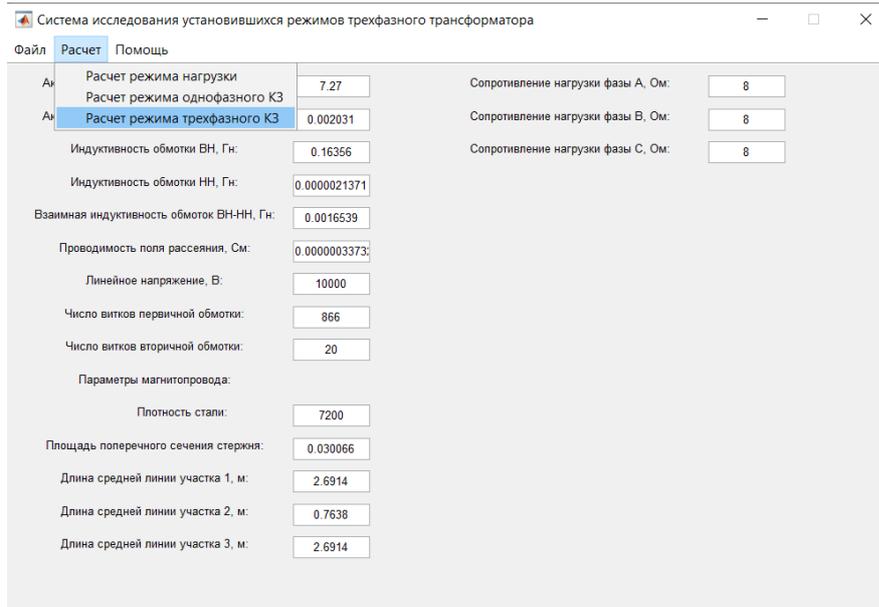


Рис. 3.2. Окно ввода данных СТ и вкладка меню для выбора режима работы СТ

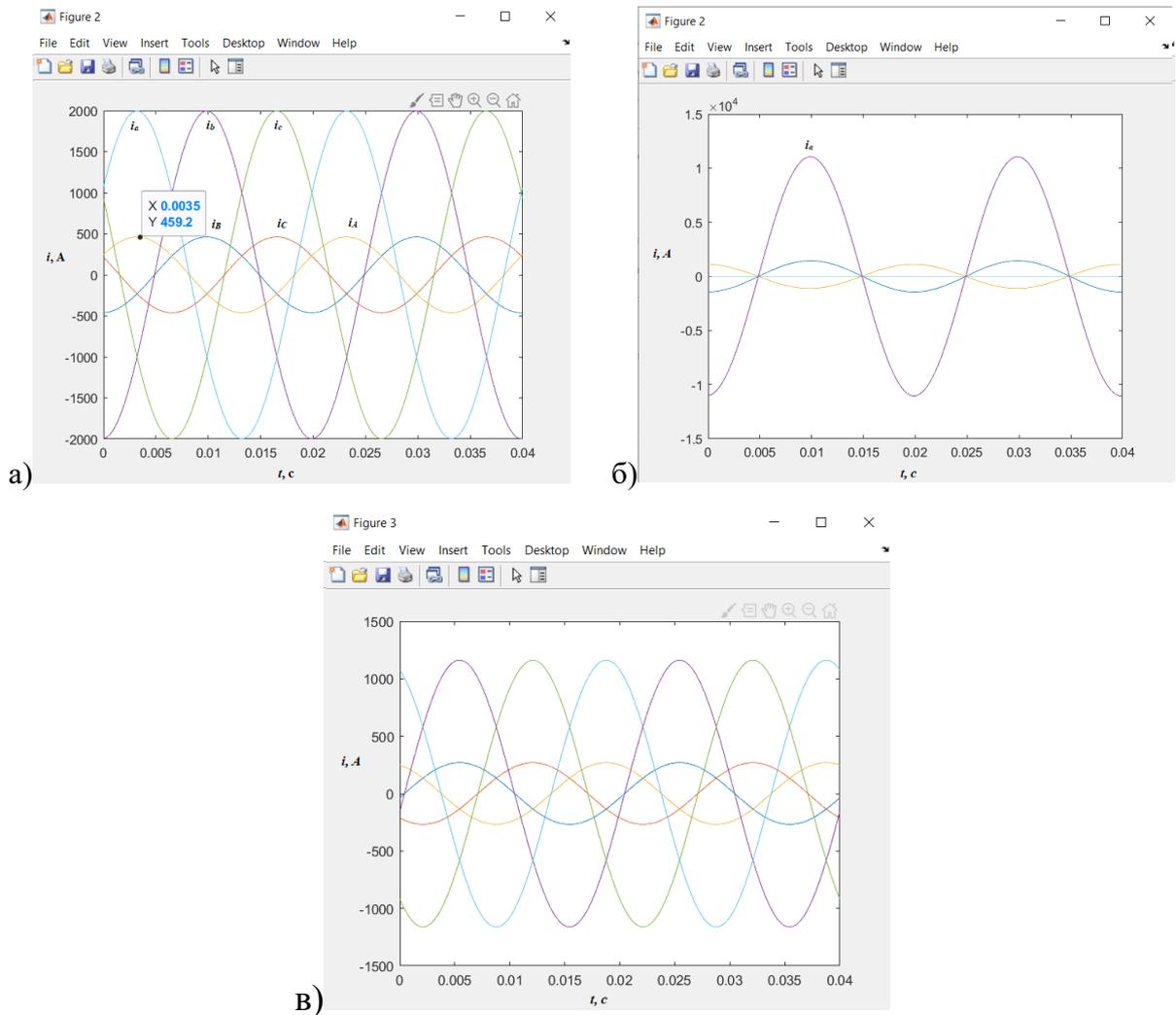


Рис. 3.3. Кривые первичных и вторичных токов СТ в режиме трехфазного КЗ (а), однофазного КЗ фазы А (б) и режиме номинальной нагрузки (в)

### **3.3. Апробация моделей переходных режимов работы трансформаторов**

#### **3.3.1. Анализ модели учета взаимного влияния полей вне магнитопровода на примере однофазного трансформатора**

По результатам проведенных исследований были созданы три варианта математической модели однофазного двухобмоточного трансформатора с различными вариантами индуктивностей [92]:

- 1) Индуктивности первичной и вторичной обмоток заданы с использованием стандартного блока RLC Branch;
- 2) индуктивности первичной и вторичной обмоток заданы схемой замещения с использованием управляемого источника тока;
- 3) в первичной и вторичной обмотках заданы матрицы индуктивностей с учетом взаимных индуктивностей.

Данные варианты приведены на рис. 3.4. Схема включения однофазного трансформатора на нагрузку приведена на рис. 3.5.

На рис. 3.6 приведены результаты моделирования. Из рисунка видно, что кривые 1 и 2, полученные на первой и второй модели, полностью совпали, что говорит о возможности использовать схему замещения рис. 2.19,б для моделирования индуктивности. Кривая 3, полученная с использованием матрицы индуктивностей, отличается от кривых 1 и 2 в первые моменты времени. Наибольшее расхождение (для пиковых значений) составляет 30%. В установившемся режиме эти кривые совпадают. Это говорит о том, что даже в однофазном трансформаторе допущения, принимаемые традиционно в отношении индуктивностей обмоток по полям вне магнитной системы, справедливы только для установившихся режимов. В переходных режимах эти допущения перестают работать. Поэтому создание ЦД трансформаторов, способных адекватно имитировать процессы в установившихся и переходных режимах, должно опираться на использование матриц индуктивностей [93].

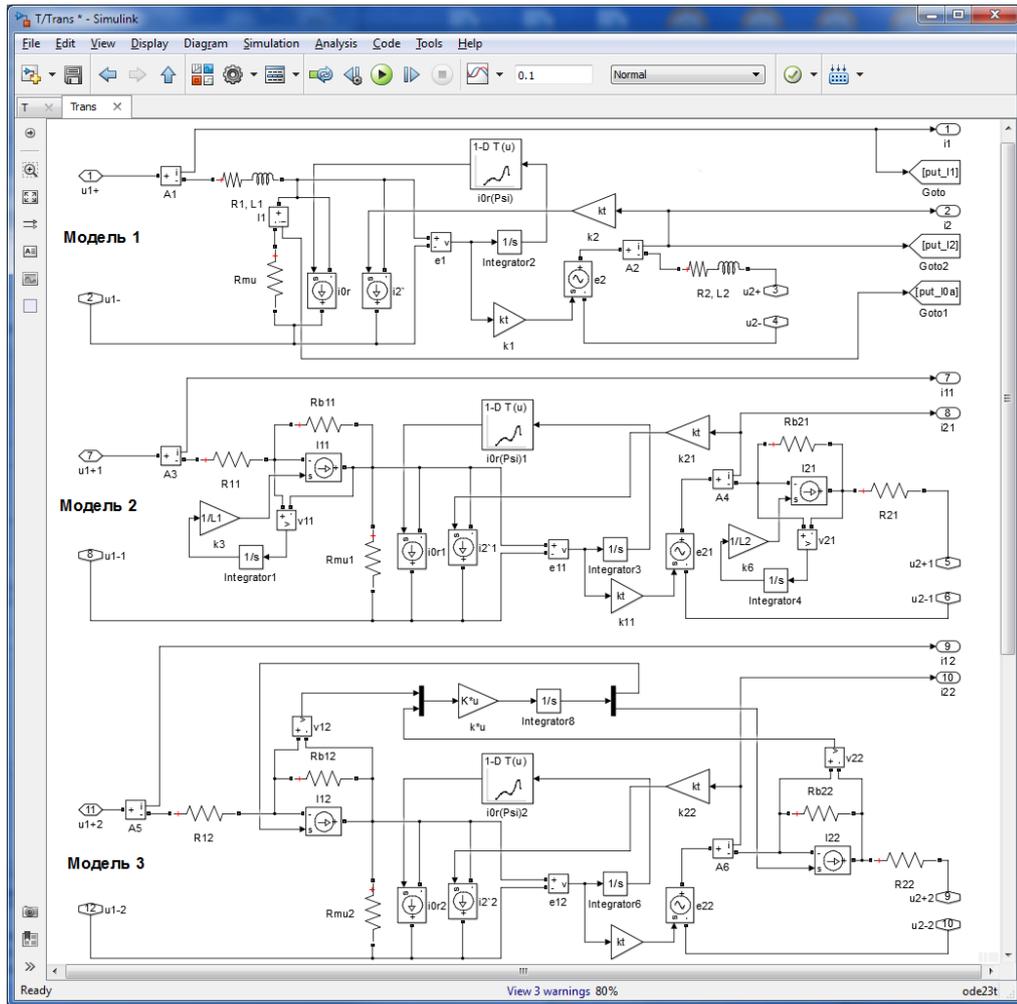


Рис. 3.4. Три варианта моделей двухобмоточного трансформатора

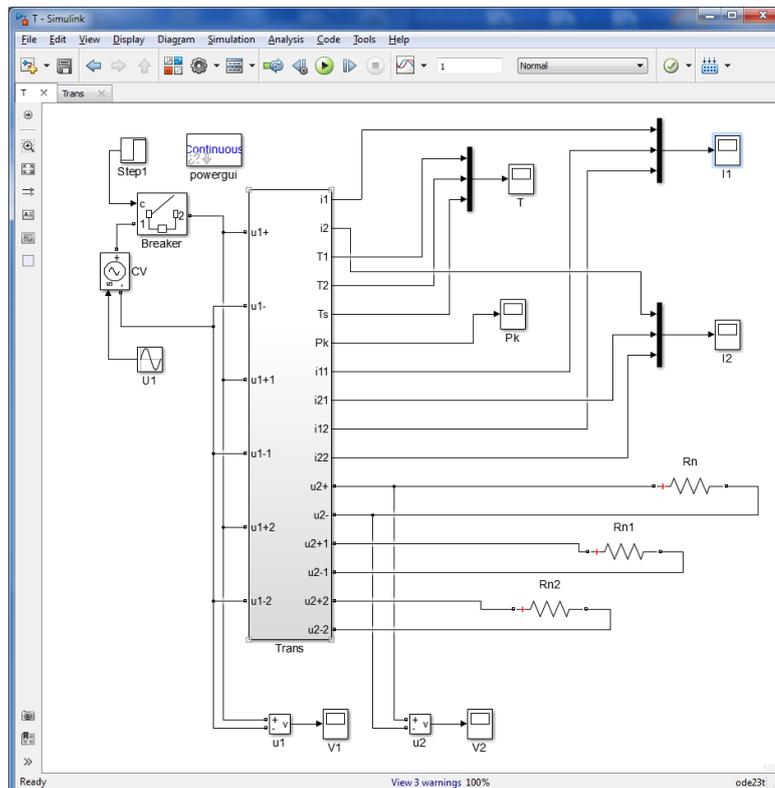


Рис. 3.5. Схема включения однофазного трансформатора на нагрузку

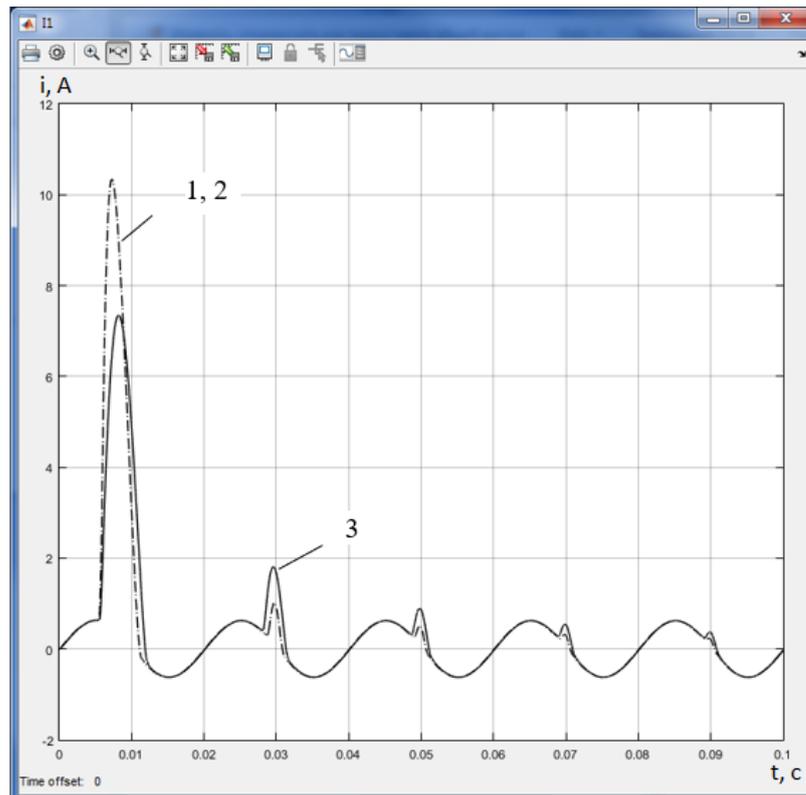


Рис. 3.6. Результаты расчета включения однофазного трансформатора на нагрузку с использованием трех моделей переходных режимов (кривая 1 – модель с использованием стандартного блока RLC-branch, кривая 2 – модель с использованием управляемого источника тока, кривая 3 – модель с использованием матрицы индуктивностей)

### 3.3.2. Анализ модели переходных режимов работы трехфазного двухобмоточного трансформатора

Для трехфазного двухобмоточного трансформатора ТМГ-1000-10/0,4 Д/Ун-11 были построены две модели: с учетом взаимных индуктивностей обмоток по полям вне магнитной системы (рис. 2.21) и без их учета (рис. П5.1). Схема включения данных моделей на различные режимы работы представлена на рис. 3.7.

Расчет параметров КЗ осуществлялся на конечно-элементной модели магнитного поля вне магнитной системы, сгенерированной с помощью созданного для этих целей параметрического генератора полевых моделей и приведенной на рис. 2.9, где показана картина магнитного поля в опыте КЗ. Картины поля, фиксируемые при расчете матрицы индуктивностей приведены на рис. 3.8.

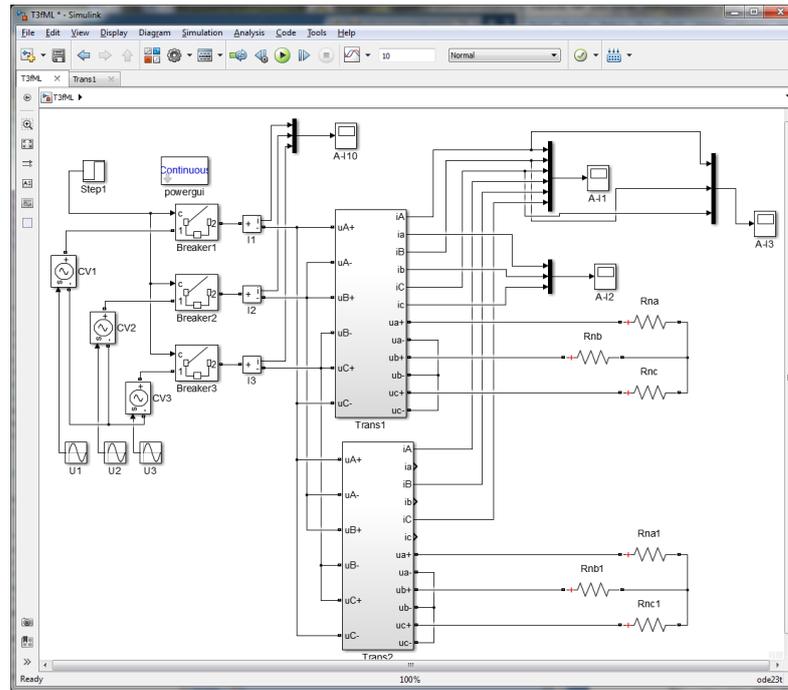


Рис. 3.7. Схема включения трехфазного двухобмоточного трансформатора

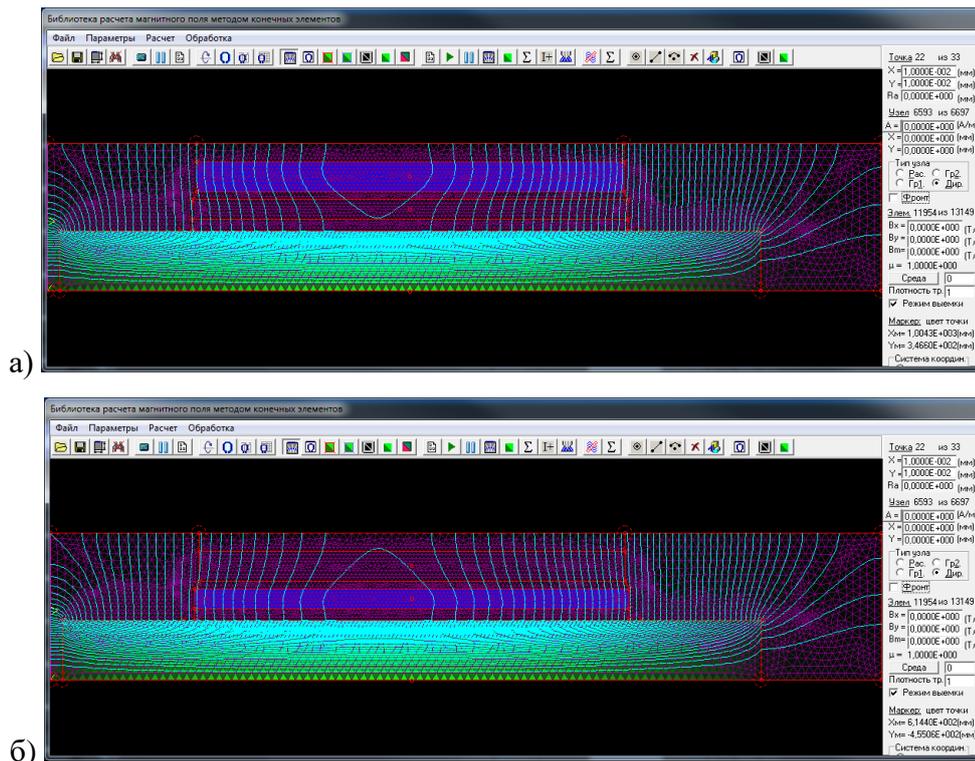


Рис. 3.8. Картины магнитного поля вне магнитной системы обмоток ВН (а) и НН (б) при расчете матрицы индуктивностей

Результаты моделирования в различных режимах работы представлены на рис. 3.9 – 3.11. Кривые, обозначенные цифрой 1, получены на модели без учета взаимной индуктивной связи по полям вне магнитной системы, цифрой 2 – с учетом взаимного влияния полей вне магнитной системы.

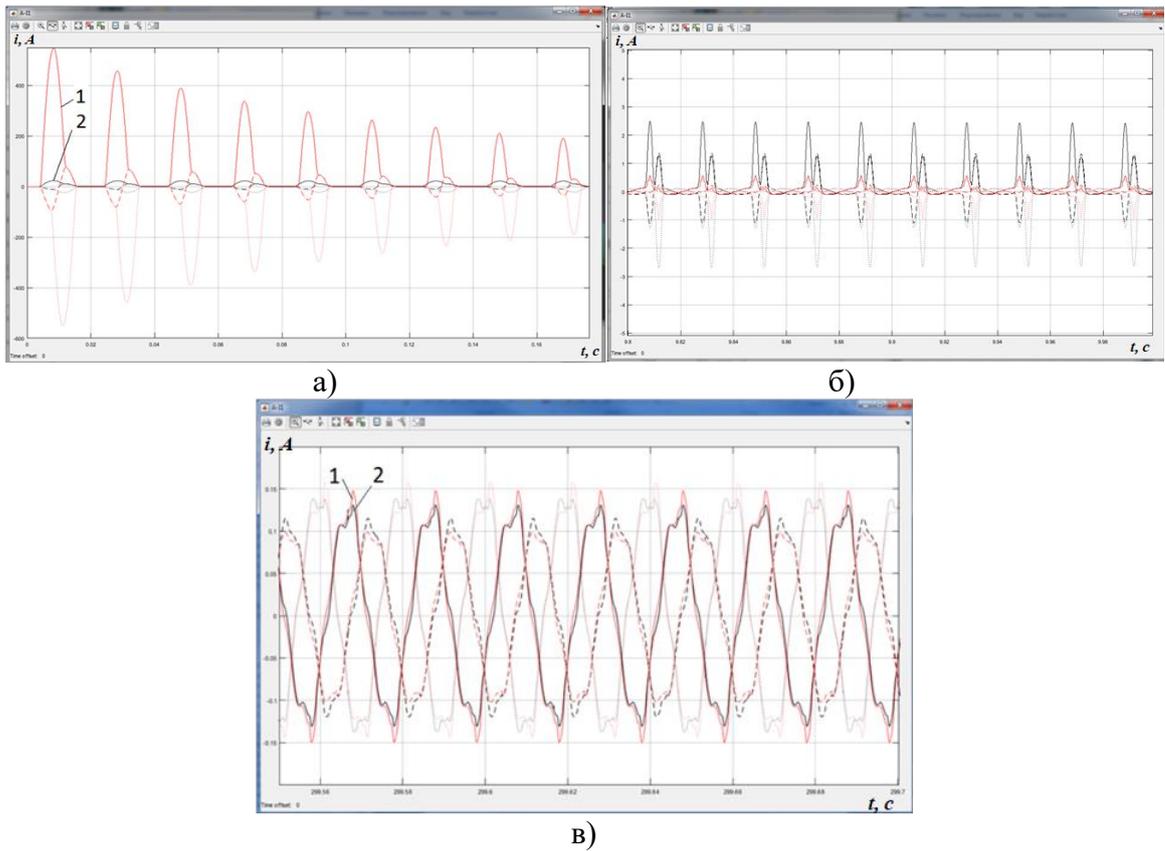


Рис. 3.9. Результаты включения трансформаторов на режим холостого хода: а – момент включения; б – установившийся режим ( $t = 10$  с); в – установившийся режим ( $t = 200$  с)

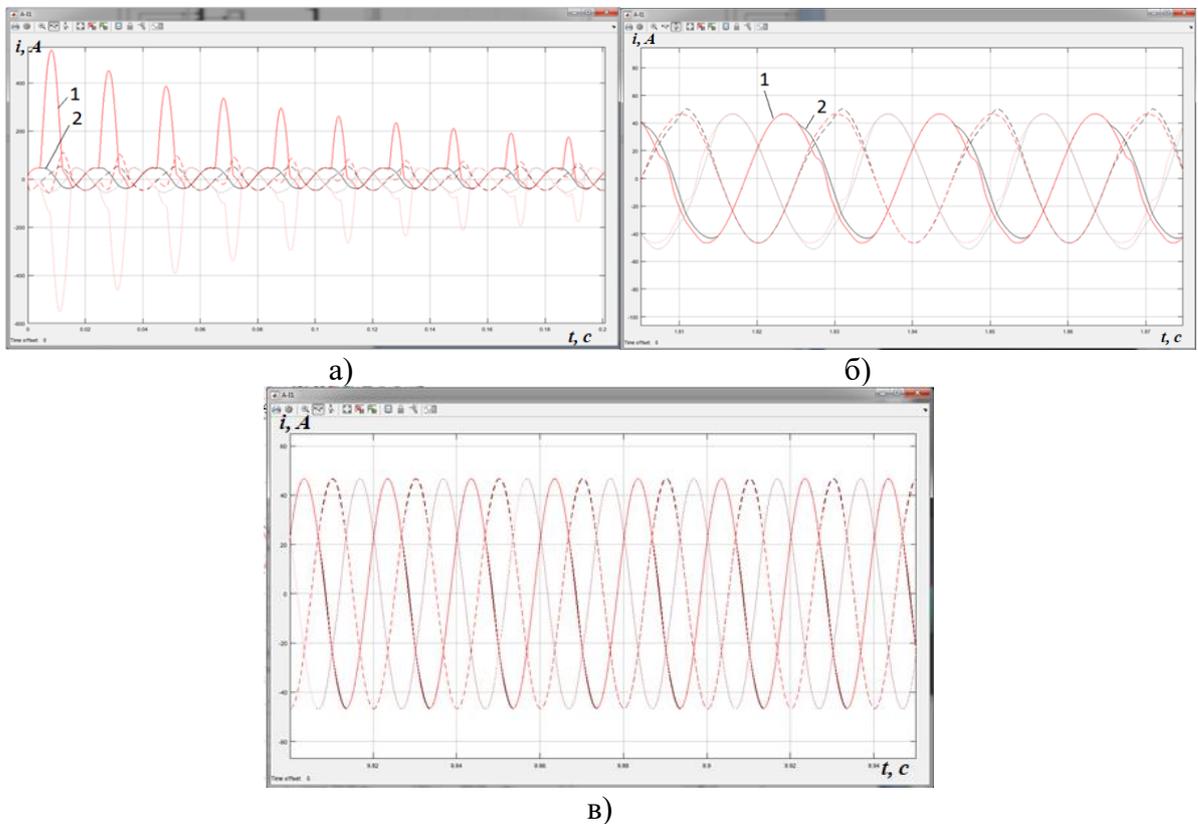


Рис. 3.10. Результаты включения трансформаторов на активную нагрузку: а – момент включения; б – установившийся режим ( $t = 2$  с); в – установившийся режим ( $t = 10$  с)

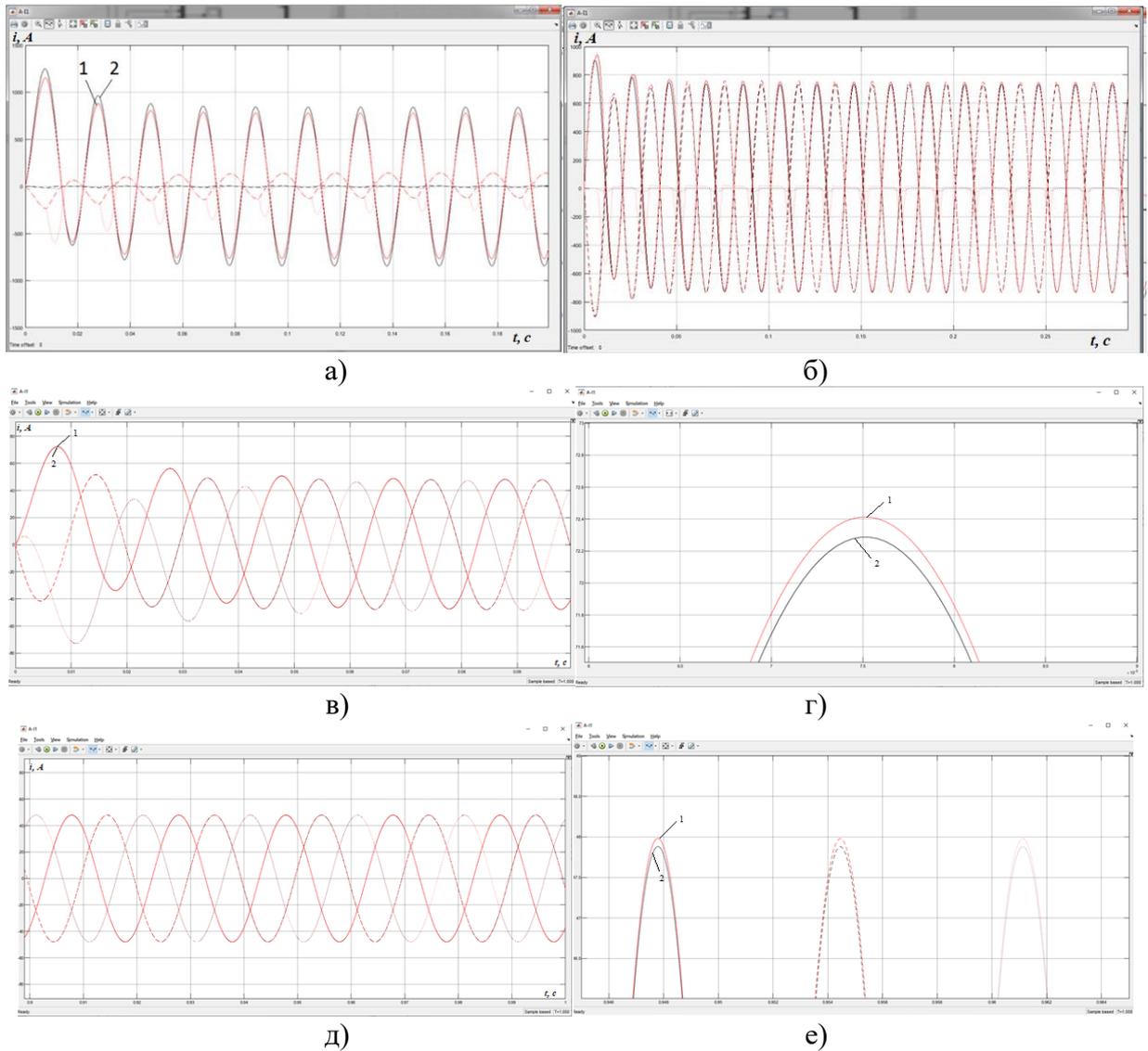


Рис. 3.11. Результаты включения трансформаторов на однофазное КЗ (а), двухфазное КЗ (б), трехфазное КЗ (в, г – расхождение при первом броске тока, д – установившийся режим, е – расхождение в установившемся режиме)

Из результатов анализа представленных кривых можно сделать вывод о том, что в установившихся режимах модели показывают практически полное совпадение (в режиме трехфазного КЗ расхождение на рис. 3.11, е составляет 0,2 %). Следовательно, результаты, полученные из модели с учетом взаимных индуктивностей поля вне магнитной системы, можно считать достоверными.

При рассмотрении установившегося режима трехфазного КЗ для случая подключения СТ на напряжение, равное по величине паспортному значению напряжения КЗ (5,49% или 549 В), получено значение тока первичной обмотки, на 1,9 % отличающееся от номинального тока. Данное расхождение

говорит о достаточной сходимости (в пределах 5% погрешности) результатов численного моделирования с экспериментальными данными.

Расхождения в результатах, полученных на разных моделях, возникают при рассмотрении переходных режимов. Например, бросок тока в режимах ХХ и нагрузки в модели без учета взаимного влияния полей вне магнитной системы оказывается больше, чем в модели, основанной на традиционных допущениях (см. рис. 3.9, а), на 95%. Объясняется это тем, что принимаемое обычно допущение о расчете индуктивностей рассеяния в схемах замещения трансформаторов на основе расчета (или регистрации на реальном оборудовании) параметров КЗ (имеется в виду именно трехфазное симметричное КЗ), не может быть использовано при имитации режима ХХ, нагрузки и несимметричных режимов работы трансформатора.

Дело в том, что опыт трехфазного КЗ – это симметричный режим, в котором токи в первичных обмотках одинаковы по величине и сдвинуты по фазе на  $120^\circ$ . НС вторичных обмоток практически равны и противоположны по направлению НС вторичных обмоток. Именно это условие обеспечило практически полное совпадение кривых (расхождение менее 1%), полученных с учетом и без учета взаимного влияния потоков вне магнитной системы, в режиме трехфазного КЗ (рис. 3.10, г).

В то же время в опыте ХХ токи вторичных обмоток равны нулю и поэтому трансформатор ведет себя как обычная нелинейная индуктивность. При этом индуктивность рассеяния первичной обмотки оказывается настолько существенной, что она ограничивает бросок тока ХХ. Это факт практически не учитывается в имитационном моделировании трансформаторов.

Следует отметить, что данный бросок тока учитывается при расчете значения тока отсечки в защитной аппаратуре трансформатора. То есть внесенные уточнения позволяют более адекватно рассчитывать параметры защиты, не увеличивая их искусственно.

В установившемся режиме ХХ (рис. 3.9, в) это также сказывается, поэтому токи ХХ на разных моделях несколько отличаются друг от друга, но это

различие незначительное ввиду малых значений токов и, следовательно, незначительностью потоков вне магнитной системы.

Так как бросок тока ХХ оказывается существенно меньшим, чем в модели без учета взаимного влияния потоков вне магнитной системы, то и при включении на нагрузку не наблюдается существенного броска тока (рис. 3.10,а) (расхождение для двух моделей составляет 93%). В установившемся режиме нагрузки (рис. 3.10,б-в) допущение о равенстве НС первичных и вторичных обмоток выполняется с относительно большой точностью (обычно расхождение в значениях НС не превышает 1%). Однако уже здесь выясняется еще одно интересное следствие, о котором практически ничего не говорится в технической литературе: если затухание токов обмоток по величине происходит достаточно быстро (в нашем случае примерно через 2 с в режиме под нагрузкой, см. рис. 3.10,б, и через 20 с в режиме ХХ), то полное затухание, после которого токи при работе под нагрузкой принимают привычную синусоидальную форму, происходит гораздо позднее (в нашем случае примерно через 10 с после включения, см. рис. 3.10,в). После этого обе модели дают практически полное совпадение решений.

Так как в несимметричных режимах также нарушается исходное допущение о равенстве НС первичных и вторичных обмоток, то при моделировании двухфазного и однофазного КЗ также фиксируются несовпадения результатов, полученных на двух моделях. Особенно большое отклонение фиксируется при моделировании однофазного КЗ (расхождение составляет 8%).

Наиболее интересный вывод, следующий из проведенного исследования, состоит в том, что обе модели дают практически совпадающие результаты при выходе на те режимы, для которых справедливы допущения о равенстве и противоположном направлении НС первичных и вторичных обмоток. Это уже косвенно свидетельствует об адекватности разработанных моделей, так как более точные модели должны давать в частном случае те же решения, что и более грубые модели, но при меньшем количестве допущений. Более точную

проверку моделей выполнить очень сложно ввиду наличия множества факторов, которые влияют на результат численного исследования.

### 3.3.3. Анализ модели переходных режимов работы трехфазного трехобмоточного трансформатора

В качестве объекта для исследования модели переходных режимов трехобмоточного трансформатора выбран СТ ТМГВА2-1600 35-10-0,4 YDY.

Имитационная модель анализа переходных режимов трехфазного трехобмоточного трансформатора с учетом взаимного влияния полей вне магнитной системы приведена на рис. 2.22. Схема включения трансформатора на различные режимы работы приведена на рис. 3.12.

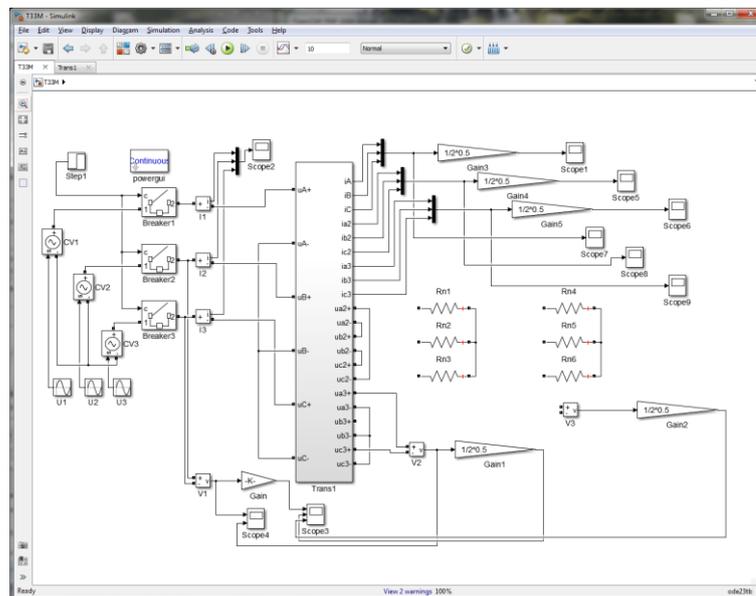


Рис. 3.12. Схема включения трехфазного трехобмоточного трансформатора на различные режимы работы

Параметры модели рассчитаны с использованием конечно-элементной модели полей вне магнитной системы, приведенной на рис. 2.12. Осциллограммы первичных токов трехобмоточного СТ при включении на различные режимы работы представлены на рис. 3.13.

Как отмечалось в разделе 2.1.4, корректный расчет переходных режимов в трехобмоточном трансформаторе без учета взаимного влияния полей вне магнитной системы вообще не возможен по причинам невозможности

однозначного расчета собственных индуктивностей рассеяния, которые оказываются различными в опытах КЗ с попарным подключением обмоток, как этого требует ГОСТ Р52719-2007 и ГОСТ 16110-82 [25, 23]. Использование разработанных моделей дает такую возможность.

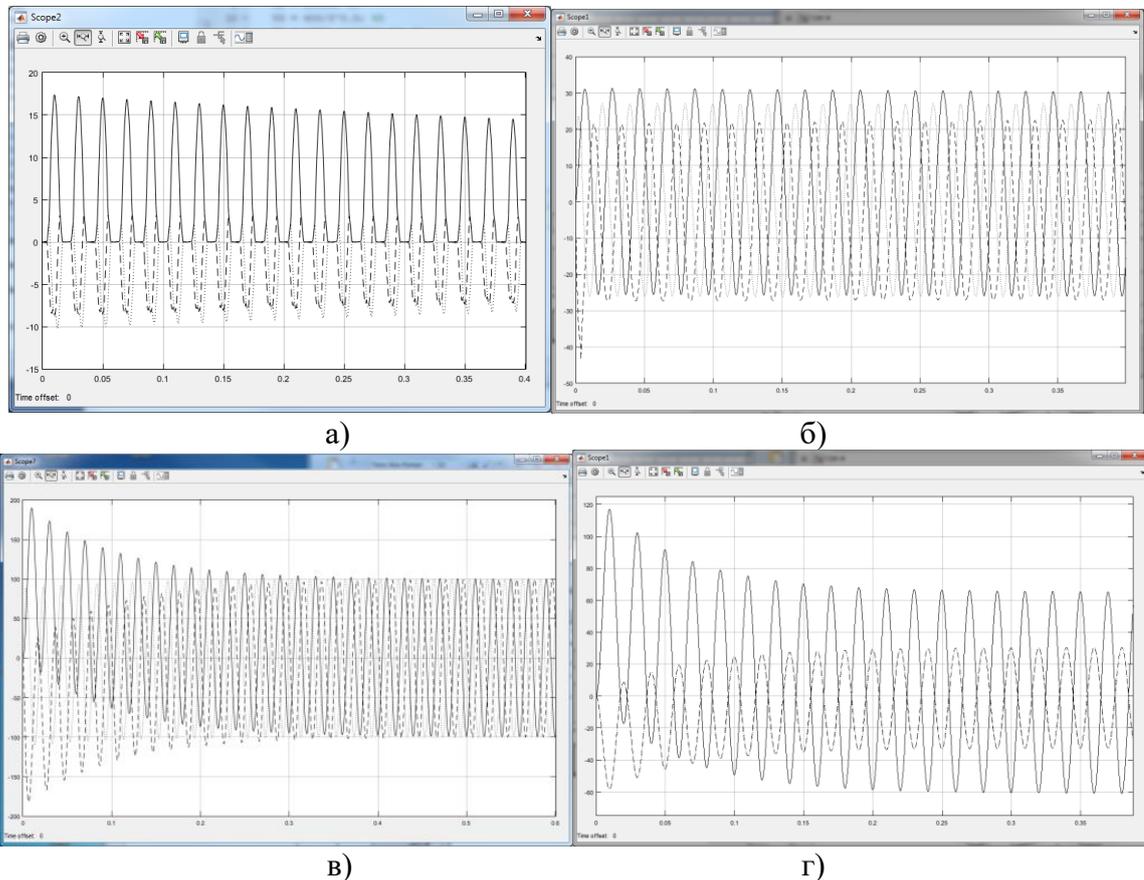


Рис. 3.13. Осциллограммы первичных токов трехобмоточного СТ: а) включение на ХХ; б) включение на нагрузку; в) включение на однофазное КЗ в ОНН; г) включение на трехфазное КЗ в ОНН

В качестве вывода можно отметить, что применение уточненных моделей переходных режимов с учетом взаимного влияния полей вне магнитной системы, позволяет вывести поверочный расчет СТ на новый уровень, на котором собственно расчет заменен анализом работы проектируемого трансформатора при различных условиях в режиме имитации этих условий. Однако в отличие от модели, описанной в разделе 3.2, данные модели не могут быть использованы при оптимизации с использованием поисковых методов ввиду значительных затрат времени (от нескольких минут до получаса) на численное интегрирование.

### Выводы по третьей главе

1. При сравнении напряжения КЗ, рассчитанного по величинам индуктивностей обмоток, определенных из полевой задачи имитации опыта КЗ, с паспортным значением получено расхождение 3,74% (при требуемом расхождении в  $\pm 5\%$ ), что говорит о достаточной точности описанной методики определения параметров СТ.

2. На основании проведенных исследований различных вариантов учета параметров СТ при создании математической модели была выявлена необходимость использования матриц индуктивностей с учетом взаимных индуктивностей при создании ЦД СТ. Аналогичные выводы можно сделать по результатам сравнительного анализа различных переходных режимов работы трехфазного двухобмоточного трансформатора ТМГ-1000/10/0,4, смоделированных с использованием моделей, учитывающих взаимные индуктивности и моделей с традиционными допущениями.

3. Модель переходных режимов работы трехфазного трехобмоточного трансформатора с учетом взаимных индуктивностей поля вне магнитной системы показывает адекватные результаты, что говорит о возможности использования данных моделей при имитации их режимов работы на стадии проектирования.

4. Полученные результаты апробации уточненной математической модели расчета установившихся режимов работы СТ свидетельствуют об основных достоинствах данной модели: точный учет геометрии и технологических особенностей СТ, высокая скорость проведения расчетов, а также возможность использования модели в качестве одного из компонентов целевой функции процедуры поиска оптимального решения трансформатора.

5. Исходя из результатов исследования моделей переходных режимов работы трехфазных двух- и трехобмоточных трансформаторов, следует нежелательность использования данных моделей при оптимизации проектов СТ ввиду значительных временных затрат на численное интегрирование.

#### **4. Разработка подсистемы расширенного поверочного расчета САПР трансформаторов с использованием имитационных моделей с учетом взаимного влияния полей вне магнитной системы**

Как отмечалось ранее, разработанные в данной диссертации модели могут быть использованы на стадии проектирования СТ в качестве основы расширенного поверочного расчета в САПР СТ.

В 70-80-х годах XX века в ИГЭУ была создана и успешно развивалась школа САПР силовых трансформаторов по руководством д.т.н., проф. Бородулина Ю.Б. Данная школа внесла значительный вклад в разработку отраслевой САПР силовых трансформаторов общего назначения класса напряжения до 35 кВ включительно [9]. Данная школа сохраняется и сегодня.

В настоящее время в ИГЭУ создана локальная версия САПР трансформаторов TransCAE, ориентированная, в первую очередь, на сферу малого и среднего бизнеса. Главное требование, которое было реализовано в данной САПР, состоит в использовании доступных для широкого класса пользователей программных средств при обеспечении уровня научного потенциала используемого математического аппарата, характерного для современных CAE-систем.

Основой данной САПР является табличный процессор Microsoft Excel, обеспечивающий разработчика функциональных модулей САПР и проектировщика достаточно мощной и современной системой программирования VBA, работа с которой не требует высокой квалификации программиста. В то же время программист избавляется от необходимости кодирования рутинных операций по обеспечению интерфейсных конструкций, высвобождая время для реализации программных кодов инженерного характера (рис. 4.1).

Рассмотрим существующую структуру САПР и определим в ней место расширенных поверочных расчетов.

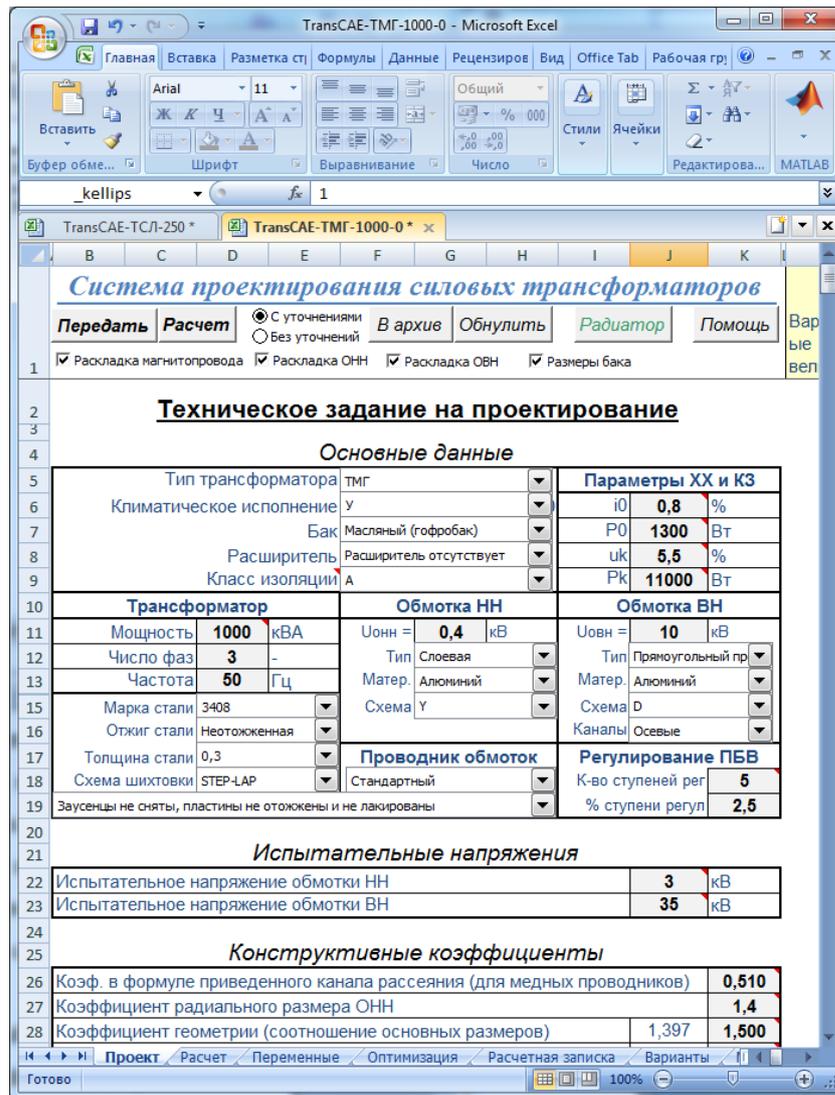


Рис. 4.1. Главное интерфейсное окно САПР СТ TransCAE

#### 4.1. Существующая система САПР СТ

Обобщенная методика проектирования с применением САПР, о которой ведется речь, представлена на рис. 4.2. Проектный расчет выполняется на основании технического задания (ТЗ) с учетом рекомендаций, приведенных в справочной литературе и РД [54].

На рис. 4.1 приведен пример ТЗ и рекомендаций (основных коэффициентов) в главном интерфейсном окне. Так как пакет Microsoft Excel не адаптирован к решению инженерных задач, то предполагается, что проектные операции, требующие сложного математического аппарата, отсутствующего в Microsoft Excel, должны быть реализованы с использованием внешних

приложений связанных с Microsoft Excel посредством инструментария COM-технологии Windows.

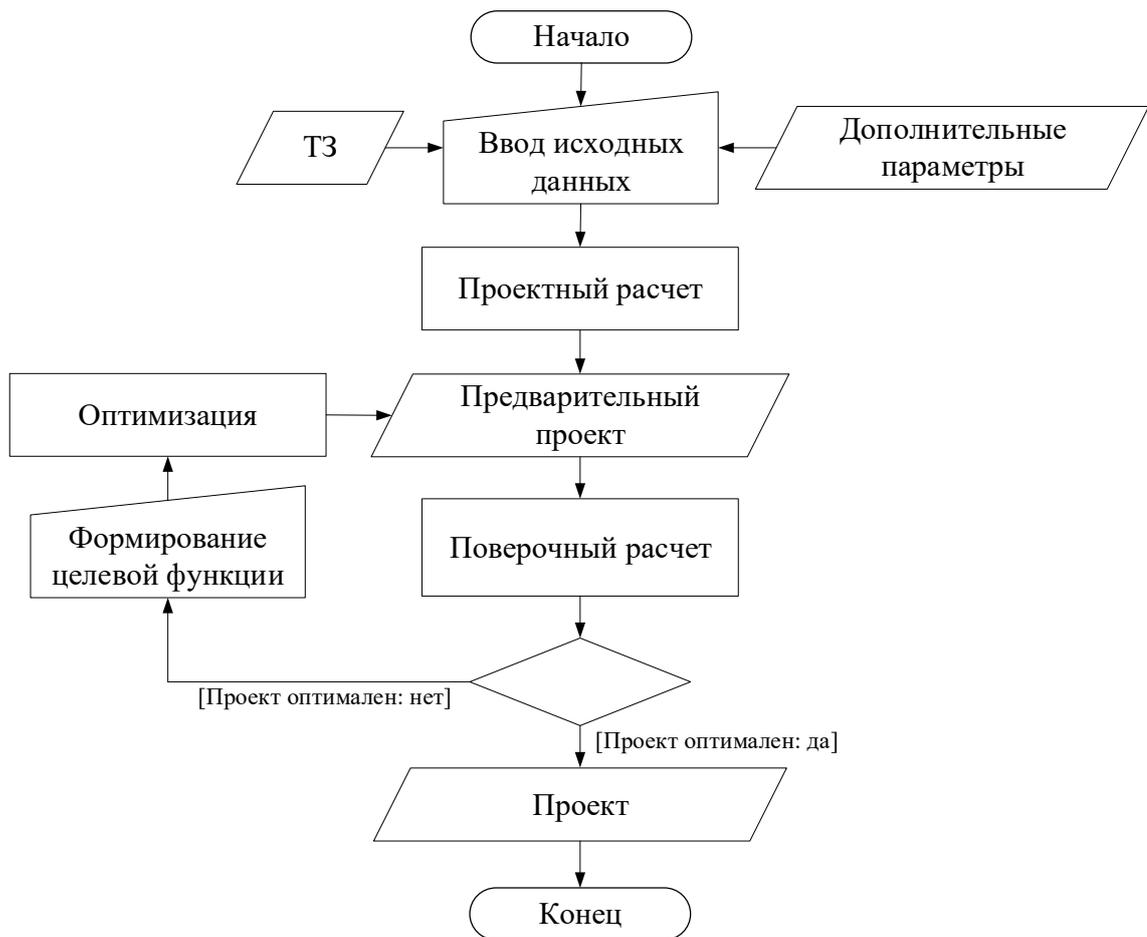


Рис. 4.2. Обобщенная методика проектирования с использованием САПР СТ

По результатам проектного расчета проводится поверочный расчет с целью определения фактических параметров СТ (сопротивления обмоток, потери ХХ и КЗ, напряжение КЗ). При проведении поверочного расчета возникает задача по расчету магнитного поля СТ. В этом случае используется разработанная в ИГЭУ библиотека конечно-элементного моделирования физических полей EMLib [102, 120, 122], которая организована в виде DLL, поставляющей в VBA-подпрограммы функции генерации модели и программирования численного эксперимента. Структура программного обеспечения САПР СТ представлена на рис. 4.3.

Как правило, в современных условиях проектирования большую роль играет экономичность проекта. Таким образом, целесообразно использование

подсистемы оптимизации проекта, что предполагает предварительное формирование функции цели.

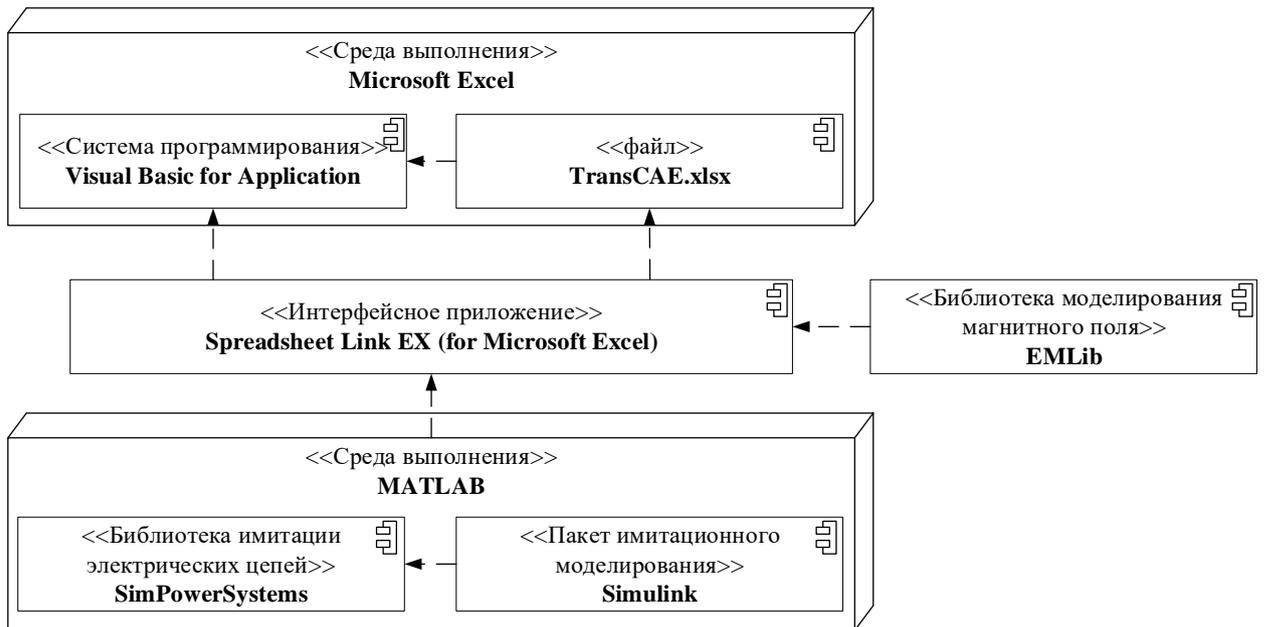


Рис. 4.3. Структура программного обеспечения САПР СТ

Для оптимизации проектируемого трансформатора используется либо разработанная собственными силами процедура поиска глобального экстремума с использованием коэволюционного генетического алгоритма, либо алгоритм поиска решения [10, 34, 111], реализованные в математическом пакете MATLAB, связанном с Microsoft Excel по средством инструмента SpreadsheetLink [48, 100].

По окончании процедуры поиска оптимального решения поверочный расчет повторяется, и в качестве итогового решения получен проект СТ, удовлетворяющий требованиям исходного ТЗ.

Стоит отметить, что в описанной выше структуре отсутствует процедура расширенного поверочного расчета, т.е. отсутствует возможность рассмотреть поведение СТ в наиболее ответственных режимах работы на этапе проектирования. Это может привести к необходимости выполнения большего числа испытаний, т.к. зачастую даже идеально спроектированный и оптимизированный трансформатор на этапе испытаний оказывается непригодным к дальнейшей эксплуатации.

Таким образом, в существующую методику проектирования СТ с использованием САПР целесообразно ввести подсистему расширенного поверочного расчета (рис. 4.4).

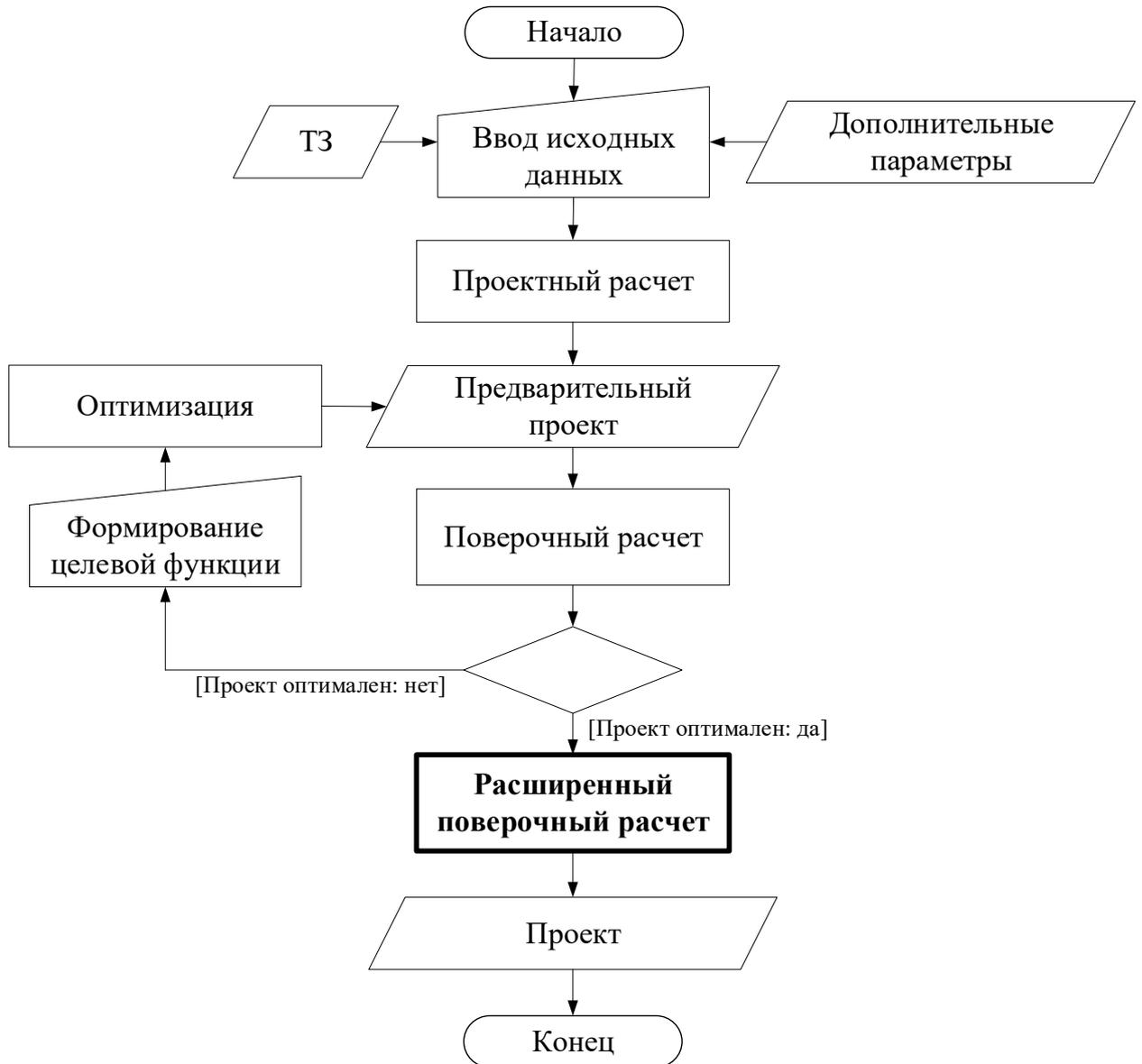


Рис. 4.4. Обобщенная методика проектирования с использованием САПР СТ, включающая расширенный поверочный расчет

## 4.2. Разработка подсистемы расширенного поверочного расчета САПР СТ

Подсистема расширенного поверочного расчета САПР СТ TransCAE организована в форме автономного листа рабочей книги Microsoft Excel, представленного на рис. 4.5.

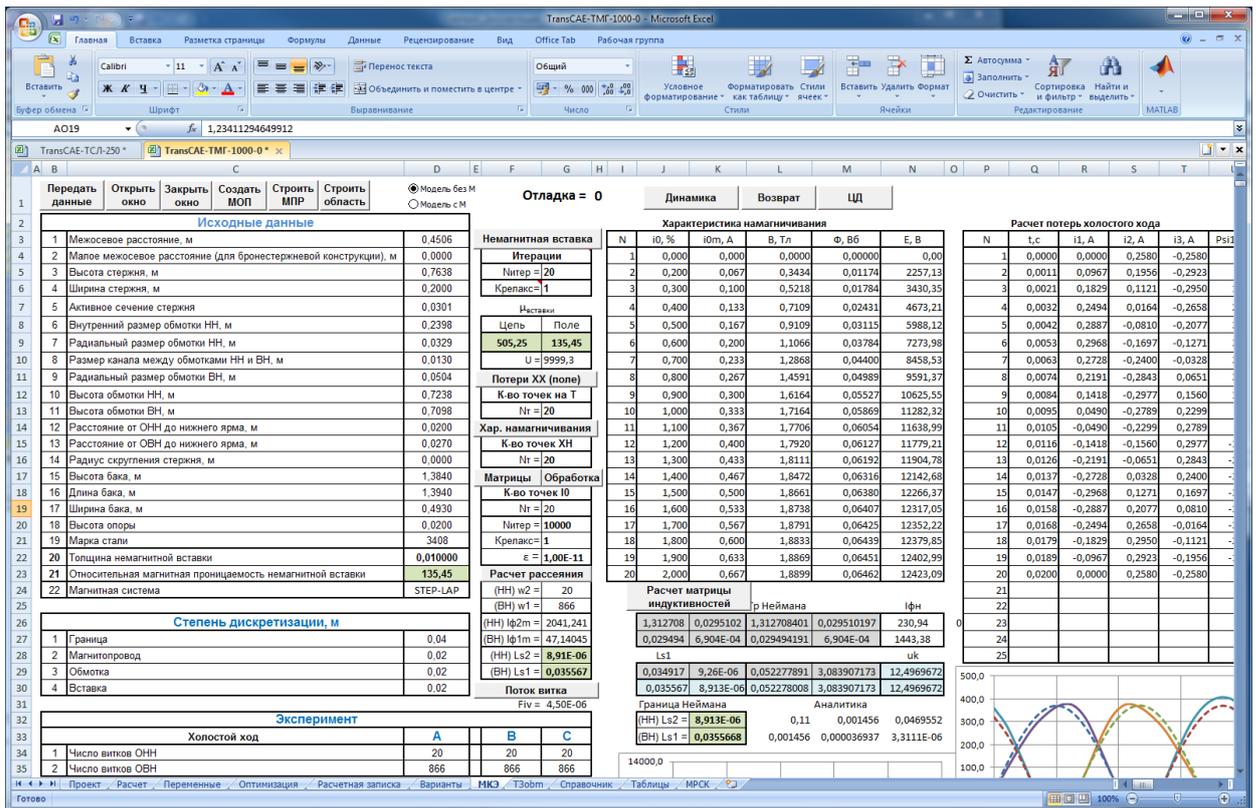


Рис. 4.5. Подсистема расширенного поверочного расчета САПР СТ TransCAE

Исходные данные для расширенного поверочного расчета в форме имитационного эксперимента передаются с листа «Проект» (см. рис. 4.1). По ним с помощью VBA-макросов и внедренной в Microsoft Excel библиотеки моделирования физических полей EMLib генерируются конечно-элементные модели для расчета основного магнитного поля (рис. 2.1) и поля рассеяния (рис. 2.9 и т.п.). Управление задачами осуществляется с использованием виртуальных кнопок. В частности, для решения задач данной диссертации используются кнопки «Расчет рассеяния», инициирующей имитацию опыта КЗ, и кнопка «Расчет матрицы индуктивностей». В обоих случаях вызываются программы реализации численного эксперимента, реализующие серии численных расчетов магнитного поля и обработку полученных результатов. Рассчитанные значения индуктивностей передаются на лист подсистемы расширенного поверочного расчета.

Следует отметить, что методика создания программ для генерации произвольных полевых моделей и реализации серий численных расчетов адаптирована под типовую квалификацию инженера-проектировщика. Данная

методика опробована на студентах, магистрантах, аспирантах и инженерах нескольких предприятий электромашиностроения. Результаты говорят о достаточно быстром вхождении в проблематику, после чего пользователи, обладающие начальными навыками программирования, оказываются способными создавать собственные исследовательские подсистемы для решения частных специфических задач исследовательского характера. Необходимый инструментарий для создания развитой интерфейсной поддержки проекта предоставляет непосредственно пакет Microsoft Excel.

Имитационное моделирование силовых трансформаторов осуществляется либо с использованием приложения MATLAB Simulink, либо с использованием приложения с открытой лицензией SciLab Xcos. В учебно-исследовательских целях в данной диссертации акцент был сделан на приложение MATLAB Simulink. Для вызова подсистемы имитационного моделирования используется кнопка <Динамика>, при нажатии на которую данные о параметрах используемых имитационных моделей передаются в соответствующий математический пакет (в данной диссертации акцент сделан на использовании пакета MATLAB). Собственно исследование имитационной модели осуществляется с использованием инструментария MATLAB Simulink SimPowerSystems. При этом инженер может по своему усмотрению изменять модели, адаптируя их под конкретные задачи по мере накопления информации о проблематике имитационного моделирования трансформаторов. Результаты моделирования (кривые изменения токов обмоток) в виде массивов данных передаются обратно на лист подсистемы уточненного поверочного расчета для последующей численно обработки с использованием инструментария Microsoft Excel.

Таким образом в рассматриваемой САПР СТ заложены принципы открытости и гибкости, обеспечивающие развитие системы как в плане расширения классов решаемых задач, так и в плане совершенствования используемого математического аппарата. Поэтому переадаптация данной системы на проблематику конкретных предприятий не составляет труда.

Так, в рамках данной диссертации подсистема уточненного поверочного расчета САПР СТ TransCAE была расширена дополнительным рабочим листом, функционал которого адаптирован к решению задачи уточненного исследования трехобмоточных трансформаторов (рис. 4.6).

Параметры трехобмоточного трансформатора		Расчет Lk - ВН-СН	Расчет Lk - СН-НН	Расчет Lk - ВН-НН	Kt	dnp	Ацентр/Акрай	Fцентр/Фкрай	FiEmLib/FiMatLab
Расчет матрицы L - ВН-СН		Расчет матрицы L - СН-НН		Расчет матрицы L - ВН-НН		0,100	0,00000295	0,000001851	0,000001602
Uk1		Uk2		Uk3					
Обмотка ВН		Обмотка СН		Обмотка НН		0,050	0,00000214	0,000001345	0,000001393
1	Мощность обмотки	S1 = 1600000 Вт	S2 = 400000 Вт	S3 = 1200000 Вт		0,000000346	0,000002176	0,000002014	0,0
2	Номинальное напряжение	U1 = 35000 В	U2 = 10000 В	U3 = 400 В		0,000000286	0,000001798	0,000001869	0,0
3	Схема	s1 = Y	s2 = D	s3 = Y		0,010	0,000000511	0,000003211	0,000002958
4	Сопротивление при расчетной температуре	R1 = 5,995983 Ом	R2 = 2,90225 Ом	R3 = 0,000424 Ом		0,000000445	0,000002793	0,000002926	0,0
5	Число витков обмотки	w1 = 1564	w2 = 738	w3 = 17		0,001	0,000000757	0,000004754	0,000004500
6	Внутренний диаметр обмотки (по меди)	Dv1 = 0,477 м	Dv2 = 0,362 м	Dv3 = 0,238 м			0,000000695	0,000004370	0,000004388
7	Наружный диаметр обмотки (по меди)	Dn1 = 0,651 м	Dn2 = 0,417 м	Dn3 = 0,348 м					
8	Высота обмотки (по меди)	L1 = 0,352 м	L2 = 0,412 м	L3 = 0,440 м					
1	Высота магнитопровода	hm = 0,93 м	Uk1% = 3,41	In в 1	In в 2	Эксп			
2	Высота стержня	hc = 0,51 м	Uk2% = 3,136	16,8	6,2	3,41			
3	Диаметри стержня	dc = 0,218 м	Uk3% = 9,01	2,01	5,102	3,136			
4	Ширина стержня (самого широкого пакета)	bp = 0,21 м	Uф	20,7	20,65	9,01			
5	Межосевое расстояние стержней	C = 0,67 м	Uл						
6	Активное сечение стали магнитопровода	Sa = 3,42E-04 м <sup>2</sup>	Uk1 = 689,0675	1193,5					
7	Высота бака	Hb = 1,25 м	Uk2 = 313,6	313,6					
8	Длина бака (по фронту)	Lb = 2,1 м	Uk3 = 1820,674	3153,5					
9	Ширина бака (в профиль)	Bb = 0,82 м	Иф	Ил					
10	Расстояние от магнитопровода до крышки	hkm = 0,267 м	И1 = 26,39316	26,39315516					
11	Потери ХХ	P0 = 1976 Вт	И2 = 13,33333	23,09401077					
			И3 = 1732,051	1732,050808					
			И1 = 26,39316 А	И2 = 0 А	И3 = 2428,17 А				
			Им1 = 37,32556 А	Им2 = 0 А	Им3 = 3433,951 А				

Рис. 4.6. Рабочий лист подсистемы расчета параметров КЗ трехобмоточных трансформаторов

В заключение можно отметить, что разрабатываемая таким образом САПР СТ TransCAE предназначена не только для решения задач собственно проектирования трансформаторов. Принципы открытости и гибкости, заложенные в ней, позволяют выходить на решение таких проблем, которые в настоящее время решаются только с использованием мощных дорогостоящих САЕ-систем (с учетом обоснованности принятых допущений). При этом система остается доступной широкому классу пользователей РФ.

## Выводы по четвертой главе

1. САПР СТ, разработанная на базе ИГЭУ, построена на базе табличного процессора Microsoft Excel с возможностью связи с внешними приложениями посредством инструментария COM-технологии Windows. Подобным образом

производится генерация конечно-элементных моделей для расчетов магнитного поля СТ с использованием библиотеки моделирования магнитного поля EMLib, а также оптимизация трансформаторов с использованием библиотеки генетических алгоритмов, реализованной в математическом пакете MATLAB.

2. При рассмотрении существующей структуры САПР СТ выявлена необходимость ее дополнения подсистемой расширенного поверочного расчета с использованием имитационных моделей, рассмотренных ранее.

3. Разработана структура автономного листа подсистемы расширенного поверочного расчета СТ, а также в данную подсистему внедрена дополнительная подсистема расширенного поверочного расчета трехобмоточных трансформаторов.

5. Внедрение разработанных моделей в САПР СТ TransCAE позволяет расширить функционал подсистемы поверочного расчета, обеспечивая уточненный расчет параметров КЗ и возможность исследования произвольных режимов работы проектируемого трансформатора в составе конкретной ЭС. В итоге это позволит повысить надежность спроектированного устройства.

## Заключение

Современные тенденции цифровизации энергетической области обуславливают необходимость создания уточненных математических моделей сетевого оборудования. Одним из наиболее интересных типов устройств с точки зрения моделирования является силовой трансформатор ввиду особенностей его конструкции и параметров.

В данной диссертации была поставлена и достигнута цель, заключающаяся в расширении функционала подсистем поверочного расчета в САПР СТ за счет уточненных имитационных моделей, позволяющих уже на стадии проектирования анализировать особенности характерных режимов работы данных устройств в составе электрических сетей. Данная цель достигнута путем разработки и использования имитационных моделей, построенных на основе комбинации полевых и цепных моделей.

В диссертации решены поставленные задачи:

1. Предложена методика определения параметров КЗ СТ с учетом взаимного влияния полей вне магнитной системы, позволяющая учитывать это влияние при анализе различных режимов работы СТ.
2. Разработаны имитационные модели расчета установившихся и переходных симметричных, несимметричных и аварийных режимов работы СТ с учетом взаимного влияния полей вне магнитной системы.
3. Сформулирована методика анализа установившихся нормальных и аварийных режимов работы участков ЭС, содержащих СТ, с учетом возможной несимметрии.
4. Осуществлена программная реализация подсистемы расширенного поверочного расчета в составе САПР СТ, которая позволяет производить анализ режимов работы СТ как на стадии проектирования, так и в режиме реального времени в составе энергосистемы, анализируя при этом влияние параметров СТ на работы ЭС.

5. Полученные модели СТ апробированы в различных режимах работы и показывают неплохие результаты с точки зрения точности и быстродействия.

Дальнейшее направление работ состоит в расширении возможностей САПР СТ с точки зрения доработки системы поверочных расчетов в применении к другим процессам, протекающим в трансформаторе, например, определении электродинамических усилий в режиме КЗ, что позволит создать единую среду проектирования трансформаторов, имеющую высокую точность и быстродействие.

Основные результаты работы:

1. Осуществлен анализ существующих методик определения параметров КЗ СТ и методов анализа режимов работы СТ и участков электрических сетей, содержащих СТ.

2. Разработана методика расчета параметров КЗ СТ, в том числе и взаимных индуктивностей обмоток по полям вне магнитной системы, основанная на решении задачи расчета магнитного поля СТ. Расхождение полученных результатов с апробированными методиками не превышает 1,8 %. Также разработана методика аналитического расчета взаимных индуктивностей обмоток, находящихся на разных стержнях. Это позволило повысить точность расчета переходных и аварийных режимов работы СТ.

3. Созданы имитационные модели, позволяющие анализировать различные режимы работы СТ, в том числе и переходные аварийные с учетом возможной несимметрии, сохраняя при этом высокую точность: полученные модели в установившемся режиме трехфазного КЗ дают результаты, на 2% отличающиеся от результатов испытаний реальных трансформаторов, однако в некоторых переходных режимах работы показывают результаты на 95% точнее существующих методик.

4. На основании вышеназванных моделей сформулирована методика построения цифрового двойника СТ с учетом взаимного влияния полей вне магнитной системы СТ и его нелинейных характеристик, позволяющая

производить как уточненные поверочные расчеты в составе САПР СТ, так и эксплуатационные расчеты с целью анализа влияния параметров СТ на электрическую сеть.

5. Предложена методика анализа участков электрических сетей, содержащих СТ, позволяющая исследовать эксплуатационные режимы работы в «реальном времени», а так же «на перспективу» с целью определения наиболее тяжелых режимов работы как СТ, так и ЭС в целом и последующим выбором и верной настройкой оборудования и защитной аппаратуры.

6. Разработана подсистема расширенного поверочного расчета в составе САПР СТ с использованием имитационных моделей с учетом взаимного влияния полей вне магнитной системы. Данная подсистема прошла стадию апробации на ООО «Трансформер» (г. Подольск) и ООО «НПК «АВТОПРИБОР» (г. Владимир).

7. Описанные модели апробированы при анализе различных режимов работы реальных устройств и показывают высокие точность и быстродействие.

Полученные результаты могут быть использованы как в составе подсистемы уточненного поверочного расчета, интегрированной в САПР СТ, так и в формате автономного элемента цифрового прототипа изделия. Использование разработанной САПР целесообразно на предприятиях малого и среднего бизнеса, занимающихся серийным производством силовых трансформаторов. Цифровой прототип изделия предполагается к использованию как элемент цифрового двойника участка распределительной сети при анализе ее режимов работы как «на перспективу», так и в режиме «реального времени».

## Библиография

1. Амромин А.Л. Исследование и разработка методов расчета индуктивных параметров рассеяния мощных преобразовательных трансформаторов. Дисс. на соиск. уч. степ. канд. тех. наук. М., 1974.
2. Аветисян Д.А., Соколов В.С., Хан В.Х. Оптимальное проектирование электрических машин на ЭВМ. – М.: Энергия, 1976.– 208с.
3. Аветисян Д.А. Основы автоматизированного проектирования электромеханических преобразователей: учеб. пособие для электромехан. спец. вузов. – М.: Высш. шк., 1988.– 271с.
4. Бабис Р.С., Лейтес Л.В. Расчет сопротивления короткого замыкания пары ходов многоходовой винтовой обмотки трансформатора // ЭП АВНТСК.- 1972.- Вып.1(10).- С.21-25.
5. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники: Электромагнитное поле. Учебник для студентов вузов.— 7-е изд., перераб. и доп. — М.: Высш. школа, 1978. — 231,с, ил.
6. Бики, М.А. Проектирование силовых трансформаторов. Расчет основных параметров. – М.: Знак, 2013. – 612 с.
7. Богданова, Е.В. Программно-методическое обеспечение расчетов трансформаторов / Е.В. Богданова, В.Ф. Иванов, Ю.Н. Шафир // Тезисы докладов XI междунар. научн.-техн. конференции «Трансформаторостроение - 2005», Запорожье, 2005, С. 76-77.
8. Бородулин Ю.Б., Мостейкис В.С., Попов Г.В., Шишкин В.П. Автоматизированное проектирование электрических машин: учеб. пособие для студ. вузов, обуч. по спец. "Электромеханика" / под ред. Ю.Б. Бородулина. – М.: Высш. шк., 1989. – 280 с.
9. Бородулин Ю.Б., Нуждин В.Н. Имитационные системы в проектировании и исследовании электротехнических объектов и автоматизированных комплексов: учеб. пособие. – Иваново, 1986. – 84 с.

10. Бородулин Ю.Б., Попов Г.В. Математические методы в САПР электрических машин: учеб. пособие / Иван. гос. ин-т, Иван. энерг. инст. – Иваново, 1986. – 80 с.
11. Бравичев С.Н., Быковский В.В. Применение понятия комплексной магнитной проницаемости при расчетах магнитных полей электрических машин/ Вестник Оренбургского государственного университета, №2 – «Оренбургский государственный университет» - Оренбург, 2004. –с.190-193. ISSN: 1814-6457.
12. Вайнштейн Р.А., Шестакова В.В., Коломиец Н.В. Программные комплексы в учебном проектировании электрической части станций – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 123 с.
13. Васютинский, С.В. Вопросы теории и расчета трансформаторов/Л. "Энергия", 1970. – 432 с.
14. Веников В.А. Электрические системы. Электрические сети: учеб. для вузов. – М.: Высш. Шк., 198. – 511 с.: ил.
15. Веников В.А. Электрические системы. Режимы работы электрических систем: учеб. для вузов. – М.: Высш. Шк., 198. – 511 с.: ил.
16. Веников, В.А. Физическое моделирование электрических систем / В.А. Веников, А.В. Иванов-Смоленский. – М., Л.: Гос. энергетическое изд-во, 1956. – 359 с.
17. Вихарев Д.Ю., Снитько И.С., Тихонов А.И. Аналитический расчет индуктивностей рассеяния на основе применения векторного потенциала магнитного поля // Моделирование систем и процессов: журнал.— 2021.— №1.— Т.14. – С.4 – 10
18. Вольдек А.И., Попов В.В.. Электрические машины постоянного тока и трансформаторы: учеб. для вузов. – СПб.: Питер, 2008. – 320 с.
19. Вольдек А.И. Электрические машины: учеб. для вузов – 3-е изд., перераб. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с.

20. Вычислительные модели потокораспределения в электрических системах / Б. И. Аюев [и др.] ; под ред. П. И. Бартоломея. - Москва : Флинта : Наука, 2008. - 254, [1] с. : ил., табл.; 22 см.; ISBN 978-5-9765-0697-8 (Флинта)
21. Говорков В.А., Купалян С.Д. Теория электромагнитного поля в упражнениях и задачах: [Для энерг., электротехн. И радиотехн. специальностей вузов]: 3-е издание изд., перераб. и доп. – Москва: Высш. школа, 1970. – 302 с.
22. ГОСТ 12119-80. Сталь электротехническая. Методы определения магнитных и электрических свойств
23. ГОСТ 16110-82 Трансформаторы силовые. Термины и определения.
24. ГОСТ 23501.101-87 Системы автоматизированного проектирования. Основные положения.
25. ГОСТ Р 52719-2007 Трансформаторы силовые. Общие технические условия.
26. ГОСТ Р 57412-2017. Компьютерные модели в процессах разработки, производства и эксплуатации изделий.
27. ГОСТ Р 57700.37 – 2021 Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения: национальный стандарт РФ. – М.: Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии, 2021 – Дата утверждения 16.09.2021.
28. Гусейнов А.М. Расчет в фазных координатах несимметричных установившихся режимов в сложных системах. – Электричество, 1989, №3.
29. Димо П. Узловой анализ электрических систем [Текст] / Пер. с фр. Б. Г. Андреева, О. А. Суханова; Под ред. д-ра техн. наук В. А. Веникова. - Москва: Мир, 1973. - 263 с. : ил.
30. Дьяконов В.П. MATLAB 6/5 SP1 / 7 + Simulink 5/6. Основы применения. Серия «Библиотека профессионала». – М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 800 с.
31. Дьяконов В.П. MATLAB 6/5 SP1/7 + Simulink 5/6 в математике и моделировании. Серия «Библиотека профессионала». – М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 576 с.

32. Еремин И.В., Тихонов А.И., Попов Г.В. Проектирование силовых трансформаторов с сердечником из аморфной стали / ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2014. – 84 с.
33. Еремин И.В., Подобный А.В., Каржевин А.А., Плаксин А.В., Снитько И.С., Тихонов А.И. Разработка моделей для системы автоматизированного проектирования высокочастотных трансформаторов с сердечником из аморфной стали // Молодой учёный: журнал. – Казань: ООО "Издательство "Молодой учёный". – 2020. – №5. – С.14 – 22.
34. Зайцев А.С., Тихонов А.И. Система оптимального проектирования трансформаторов. // "Радиоэлектроника, электротехника и энергетика": Тезисы докладов восемнадцатой международной научно-технической конференции студентов и аспирантов. Том 2 – М: МЭИ, 2012г. – с.177.
35. Зайцев А.С., Трофимович И.В., Тихонов А.И., Романов С.Г. Разработка системы проектирования силовых трансформаторов с использованием генетических алгоритмов для поиска оптимального решения // Состояние и перспективы развития электротехнологии (XVII Бенардосовские чтения): Материалы междунар. науч.-техн. конф. / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2013. – с.156 – 159.
36. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. Основы теории цепей: Учебник для вузов – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.
37. Зирка С.Е., Мороз Ю.И. Моделирование трехфазного трансформатора как системы с сосредоточенно-распределенными параметрами // Техн. електродинаміка. – 2014. – № 3. – С. 28–32.
38. Иванов А.В. Разработка моделей и методики проектирования токоограничивающих реакторов из ленты: дис. канд. техн. наук: 05.13.12: 05.13.18. – Иваново: ИГЭУ, 2011. – 126 с.
39. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. – М.: Энергия, 1980. – 928 с.

40. Иванов-Смоленский А.В. Электромагнитные поля и процессы в электрических машинах и их физическое моделирование. – М.: Энергия, 1969. – 304с.
41. Идельчик В.И. Электрические системы и сети: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 529 с.: ил.
42. Инкин А.И. Электромагнитные поля и параметры электрических машин. – Новосибирск: ЮКЗА, 2002. – 462 с
43. Казаков Ю.Б., Щелькалов Ю.Я. Конечно-элементное моделирование физических полей в электрических машинах; Иван. гос. энерг. ун-т им. В.И. Ленина. – Иваново, 2001. – 100 с.
44. Калантаров П.Л. Расчет индуктивностей : Справ. кн. / П. Л. Калантаров, Л. А. Цейтлин. - 3-е изд., перераб. и доп. - Л. : Энергоатомиздат : Ленингр. отд-ние, 1986. - 487,[1] с. : ил.
45. Кацман М.М. Электрические машины: учебник для студ. Учреждений сред. Проф. Образования / М.М. Кацман. – 12е изд., стер. – М.: Издательский центр «Академия», 2013. – 496 с.
46. Климов Д.А. Математическое моделирование динамических режимов работы силовых трансформаторов для автоматизированного проектирования и диагностики: дис . канд. техн. наук. – Иваново: ИГЭУ, 2007. – 143 с.
47. Климов, Д.А. Методы автоматизированного моделирования динамических режимов трансформаторов / Д.А. Климов, Г.В. Попов, А.И. Тихонов; Иван. гос. энерг. ун-т им. В.И. Ленина. – Иваново, 2006.– 100 с.
48. Комков Е.Ю. Разработка проектно-диагностического комплекса для оптимизации жизненного цикла силовых трансформаторов с принудительным охлаждением: дис. канд. техн. наук: 05.13.12: 05.14.02. – Иваново: ИГЭУ, 2008. – 178 с.
49. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. Учеб. для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2001.– 327 с.
50. Корячко В.П., Курейчик В.М., Норенков И.П. Теоретические основы САПР: учеб. для вузов.– М.: Энергоатомиздат,1987.– 400с.

51. Краткое описание ANSOFT Maxwell / ANSYS Maxwell (ANSYS Electromagnetics). – [Электронный ресурс] – <http://ansoft-maxwell.narod.ru>
52. Крон Г. Тензорный анализ сетей: Пер. с англ./Под ред. Л.Т. Кузина, П.Г. Кузнецова. – М.: Сов. радио, 1978. – 720 с
53. Кулешов А.И. Расчет и анализ установившихся режимов электроэнергетических систем на персональных компьютерах: Учеб. пособие. Изд. 3-е, доп./ ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет».- Иваново, 2019. – 184 с.
54. Лапин, А.Н. Основы автоматизированного проектирования электромеханических устройств: учеб. пособие / А.Н.Лапин // Иван. гос. энерг. ун-т им. В.И. Ленина. – Иваново, 1994. – 88 с.
55. Ледянкин Д.П. Изучение переходных процессов в объединенных электрических системах векторными методами [Текст] : Автореферат дис. на соискание ученой степени доктора технических наук / М-во высш. и сред. спец. образования РСФСР. Моск. ордена Ленина энергет. ин-т. - Москва : [б. и.], 1960. - 52 с.
56. Лейтес Л.В. Схемы замещения многообмоточных трансформаторов [Текст] / Л. В. Лейтес, А. М. Пинцов. - Москва : Энергия, 1974. - 191 с. : черт.
57. Лейтес Л.В. Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов / Л. В. Лейтес. - М. : Энергия, 1981. - 392 с. : ил.
58. Ли, К. Основы САПР (CAD/CAM/CAE) – СПб: Питер, 2004. – 560 с.
59. Лизунов С. Д., Лоханин А. К. Проблемы современного трансформаторостроения в России // Электричество. - 2000. - № 8, 9.
60. Мартынов В.А., Голубев А.Н., Алейников А.В. Применение метода переменных состояния к анализу стационарных и динамических режимов нелинейных электромагнитных устройств // Вестник ИГЭУ. – 2015. – Вып.4
61. Мартынов В.А., Голубев А.Н., Снитько И.С. Анализ электрических и магнитных цепей с использованием матриц: Учеб. пособие / ФГБОУВО

- «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина. – Иваново, 2019. -156 с. ISBN 978-5-00062-413-5
62. Мартынов В.А. Расчет неполнофазных режимов работы трехфазных трансформаторов. Ч.І. – Электричество, 2003, №9.
  63. Мартынов В.А. Расчет неполнофазных режимов работы трехфазных трансформаторов. Ч.ІІ. – Электричество, 2003, №10.
  64. Мартынов, В.А. Современные модели и методы расчета нелинейных электромеханических устройств / В.А. Мартынов; Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, Каф. ТОЭ Иваново, 2000 - 140 с.;
  65. Мартынов В.А., Снитько И.С. Математическая модель несимметричных режимов силовых трансформаторов с использованием понятия комплексной магнитной проницаемости // Вестник ИГЭУ. – 2018. – №. 6. – С. 24-31. DOI: 10.17588/2072-2672.2018.6.024-031
  66. Мартынов В.А., Снитько И.С. Моделирование режимов работы трансформаторов с использованием понятия комплексной магнитной проницаемости // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт: журнал. – Москва: ООО Издательский дом "Панорама". – 2019. – №3. – С.5 – 13.
  67. Мельников Н.А. Матричный метод анализа электрических цепей [Текст]. - 2-е изд., перераб. и доп. - Москва : Энергия, 1972. - 231 с. : черт.
  68. Михеев Г.М., Шевцов В.М., Иванова Т.Г. Методы определения индуктивности рассеяния обмоток силового трансформатора. – Чебоксары: Вестник Чувашского университета, 2009. – № 2. – С. 147 – 153.
  69. Национальная технологическая инициатива [Электронный ресурс] // Агентство стратегических инициатив. – Режим доступа: <https://asi.ru/nti>
  70. Нетушил, А.В. Об условности линеаризации модели трансформатора / А.В. Нетушил // Электричество 1998, №5.- С. 74.
  71. Норенков И.П. Системы автоматизированного проектирования: учеб. пособ. для вузов: В 9 кн. / Кн. 1. Принципы построения и структура. – М.: Высш. шк., 1986. – 127 с.

72. Норин В.А., Снитько И.С. Методика определения индуктивностей рассеяния сварочных трансформаторов // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. 2020: тезисы докладов, 12-13 марта 2020 г., г. Москва. – Москва: ООО «Центр полиграфических услуг "Радуга". – 2020. – С.361 – 361.
73. Норин В.А., Снитько И.С. Решение полевой задачи для определения характеристик сварочного трансформатора с увеличенным рассеянием // Энергия-2020. Том. 3. Электроэнергетика: Пятнадцатая всероссийская (седьмая международная) научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых; г. Иваново, 7 - 10 апреля 2020 года: материалы конференции. – Иваново: ФГБОУВО ИГЭУ им. В.И. Ленина". – 2020. – Т.3. – С.76.
74. Норри Д, де Фриз Ж. Введение в метод конечных элементов. – М.: Мир, 1981. – 304 с.
75. Обзор свободных программ для численных расчётов – Электронный ресурс: <http://s.arboreus.com/2008/03/free-software-for-solving-pdes.html>
76. Орлов И.Н., Маслов С.И. Системы автоматизированного проектирования электромеханических устройств: учеб. пособ. для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 296 с.
77. Основы моделирования катушек индуктивности в COMSOL Multiphysics® [Электронный ресурс] // <https://www.COMSOL.ru/video/inductor-modeling-in-COMSOL-multiphysics-webinar-ru>
78. Пайков И.А., Тихонов А.И. Анализ точности расчетов магнитного поля распределительных трансформаторов с использованием двухмерных моделей (XVIII Бенардосовские чтения): Материалы междунар. науч.-техн. конф. / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2015. – Т. 3. – С.185 – 188.
79. Пайков И.А., Тихонов А.И. Динамическая модель силового трансформатора на основе расчета магнитного поля методом конечных элементов: Материалы региональной науч.-техн. конф. студ., асп. и молодых ученых «Энергия–2012». Том 4 / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2012.–с.71–75.

80. Пайков И.А., Тихонов А.И. Способы сокращения размерности в задачах расчета магнитного поля: Материалы десятой международной науч.-техн. конф. студ., асп. и молодых ученых «Энергия – 2015». Том 2 / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2015. – с. 211 – 213.
81. Перспективы и состояние разработок распределительных трансформаторов массовых серий / В.А. Бормосов [и др.] [Электронный ресурс]//<http://www.transform.ru/articles/html/03project/a000001.article>
82. Программное обеспечение проектирования трансформаторов и реакторов / Ю. И. Паук [и др.] // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2009. Вып. 4. – С.26-36.
83. Расчет катушек индуктивности в 3D с помощью COMSOL Multiphysics [Электронный ресурс] // <https://www.COMSOL.ru/blogs/evaluate-your-3d-inductor-design-with-COMSOL-multiphysics/>
84. Россети: официальный сайт [Электронный ресурс] // <https://www.rosseti.ru/>
85. Рындин Е.А., Лысенко И.Е. Решение задач математической физики в системе MATLAB. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2005. – 62 с.
86. Сегерленд Л. Применение метода конечных элементов. – М.: Мир, 1979. – 392 с.
87. Семенова К.В., Тихонов А.И., Снитько И.С., Подобный А.В., Каржевин А.А. Разработка цифровых двойников силовых трансформаторов // Надежность и долговечность машин и механизмов. 2020: сборник материалов XI Всероссийской научно-практической конференции, Иваново, 16 апреля 2020 г., г. Иваново. — Иваново: ФГБОУ ВО "Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России".— 2020. – С.307 – 311.
88. Сильвестер П., Феррари Р. Метод конечных элементов для радиоинженеров и инженеров-электриков: пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 229 с.
89. Симонов М.А., Снитько И.С. Разработка модели многообмоточных трансформаторов для анализа различных режимов работы // Энергия-2021. Том 3. Электроэнергетика: шестнадцатая Всероссийская (восьмая

- международная) научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых, 6-8 апреля 2021 г., г. Иваново: материалы конференции: в 6 т. — Иваново: ФГБОУВО "Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина".— 2021.— Т.3. – С.76 – 76
90. Снитько И.С., Норин В.А., Дыдыкина Н.Н. Определение потоков рассеяния силового трехфазного трансформатора : Материалы междунар. науч.-техн. конф. XX Бенардосовские чтения / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2019.— Т.1. – С.9 – 12.
91. Снитько И.С., Пилипенко П.С. Применение математической модели несимметричных режимов многообмоточных силовых трансформаторов // Проблемы и перспективы развития электроэнергетики и электротехники: материалы Всероссийской научно-практической конференции (20-21 марта 2019 г.) — Казань: Казанский государственный энергетический университет .— 2019. – С.331 – 334
92. Снитько И.С., Тихонов А.И. Моделирование режимов работы трехфазных многообмоточных трансформаторов с учетом взаимного влияния полей рассеяния : Материалы междунар. науч.-техн. конф. XXI Бенардосовские чтения / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2021. – Т.1.–С.22–25.
93. Снитько И.С., Тихонов А.И., Стулов А.В., Мизонов В.Е.. Разработка модели переходных режимов с учетом взаимной индуктивности полей рассеяния для реализации цифрового двойника трансформатора // Вестник ИГЭУ. – 2021. – №. 4. – С. 47-56. DOI: 10.17588/2072-2672.2021.4.047-056
94. Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д.Л. Файбисовича. – М.: Изд-во ЭНАС, 2012. – 326 с
95. СТО 34.01-3.2-011-2017 Трансформаторы силовые распределительные 6-10 кВ мощностью 63-2500 кВА. Требования к уровню потерь холостого хода и короткого замыкания. Стандарт организации ПАО «Россети».
96. Стулов А.В., Трофимович И.А., Тихонов А.И. Современные тенденции в проектировании силовых трансформаторов: Материалы междунар. науч.-

- техн. конф. XIX Бенардосовские чтения / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2017. – Т. 3. – с. 182 – 184.
97. Технологии расчета электрических режимов. Формирование расчетных моделей, расчет и анализ перспективных, текущих и аварийных электроэнергетических режимов [Электронный ресурс] // [https://www.soups.ru/fileadmin/files/company/events/2018/konf\\_2\\_190718\\_prez\\_01\\_rez.pdf](https://www.soups.ru/fileadmin/files/company/events/2018/konf_2_190718_prez_01_rez.pdf)
98. Тихомиров, П.М. Расчет трансформаторов: учеб. пособие для вузов / П.М. Тихомиров. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.
99. Тихонов, А.И. Библиотека конечно-элементного моделирования магнитного поля / А.И. Тихонов. – М.: ВНИИЦ, 2006. – № 50200600161
100. Тихонов А.И., Зайцев А.С., Стулов А.В., Трофимович И.А. Разработка подсистемы оптимизации САПР распределительных трансформаторов // Вестник ИГЭУ. – 2014, Вып. 6. – с. 87 – 91.
101. Тихонов А.И., Иванов А.В., Пайков И.А., Стулов А.В. Математическое моделирование электромагнитных процессов в фольговых обмотках трансформаторов и токоограничивающих реакторов / ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2015. – 80 с.
102. Тихонов А.И., Казаков Ю.Б. Программирование численного эксперимента с использованием конечно-элементной модели магнитного поля в объектах электромеханики / ГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2008. – 80с.
103. Тихонов А.И., Каржевин А.А., Подобный А.В., Дрязгов Д.Е. Разработка и исследование динамической модели однофазного трансформатора с сердечником из аморфной стали // Вестник ИГЭУ. – 2019. – Вып. 1.
104. Тихонов А.И., Лихачева А.В., Рубцов Д.В. Моделирование электромеханических устройств в среде Simulink: метод. указ. к лаб. практикуму по теории подобия и моделирования / А.И. Тихонов, А.В. Лихачева, Д.В. Рубцов; ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2015. – 48 с.

105. Тихонов, А.И. Обоснование принципов построения цепных моделей природных процессов / А.И. Тихонов // Системный анализ в техносфере: межвуз. сб. науч. трудов; Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2002.– С.26–31.
106. Тихонов А.И. Основы теории подобия и моделирования: учеб. пособие / 2-е изд. доп. и перераб. / ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2016. – 116 с.
107. Тихонов А.И., Стулов А.В., Еремин И.В., Снитько И.С., Подобный А.В., Каржевин А.А., Плаксин А.В. Разработка технологии создания цифровых двойников силовых трансформаторов на основе цепных моделей и 2D-моделей магнитного поля // Южно-сибирский научный вестник: журнал. – Бийск: ООО МИП Политех. – 2020. – №1. – С.76 – 82.
108. Тихонов А.И., Стулов А.В., Каржевин А.А., Подобный А.В. Разработка нелинейной модели трехфазного трансформатора для исследования влияния несимметрии магнитной системы на работу устройства в произвольных режимах // Вестник ИГЭУ. – 2020. – Вып. 1, с. 22 – 31.
109. Тихонов А.И., Стулов А.В., Снитько И.С., Подобный А.В. Разработка 2D-моделей магнитного поля для реализации технологии цифровых двойников и порождающего проектирования силовых трансформаторов // Вестник ИГЭУ. – 2020. – Вып. 3, с. 32 – 41.
110. Тихонов А.И., Пайков И.А. Анализ моделей для электромагнитного расчета силовых трансформаторов // Вестник ИГЭУ. – 2015. – Вып. 3. – с. 38 – 43.
111. Тихонов А.И. Разработка моделей и методов анализа и синтеза решений в автоматизированном проектировании электромеханических устройств: дис. док. тех. наук: 05.13.12: защищена 2007: утв. 2008 / Тихонов Андрей Ильич. – Иваново, 2007. – 262 с.
112. Тихонов А.И., Шмелев А.С., Розин Е.Г. Разработка метода численного моделирования магнитного поля на основе классических положений электромагнетизма // Вестник ИГЭУ. – 2014. – Вып. 4

113. Учебно-диалоговый комплекс программ для анализа ур эл сетей на миниЭВМ ДВК-3: метод указания/ Сост. А.И. Кулешов; ИГЭУ- Иваново, 1993. – 52 с.
114. Ушаков, Д.М. Введение в математические основы САПР: курс лекций. – М.: ДМК Пресс, 2011 – 208 с.
115. Фазылов, Х. Ф. Основы теории и расчета установившихся режимов электрических систем / Х. Ф. Фазылов, Т. Х. Насыров; Ташк. политехн. ин-т им. Абу Райхана Бери. - Ташкент : Фан, 1985. - 76 с. : ил.
116. Цыкин Г.С. Трансформаторы низкой частоты. Теория, расчет и конструирование. – М.: Связьиздат. 1955. – 424 с
117. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystemss и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.
118. Шелофаст, В. Использование систем инженерного анализа для повышения качества проектирования / В.Шелофаст, Е.Стайнова // НМ – оборудование. – 2005. – Вып. 1. – С.34-37.
119. Шимони К. Теоретическая электротехника [Текст] : Пер. с нем. / Под ред. проф. К. М. Поливанова. - Москва : Мир, 1964. - 773 с. : черт.
120. Шмелев А.С., Пайков И.А., Булатов Л.Н. Методика организации численного исследования электротехнических устройств с использованием библиотеки конечно-элементного моделирования магнитного поля // Вестник ИГЭУ. – 2014. – № 1. – С. 55 – 61.
121. Эльберг М. С. Имитационное моделирование: учеб. пособие / М. С. Эльберг, Н. С. Цыганков. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2017. – 128 с.
122. Stulov A., Tikhonov A., Snitko I. Generative design methodology for electrical machines design based on equivalent circuit and field models of physical processes // В сборнике: Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020). Серия: Lecture notes in mechanical engineering. Chelyabinsk, 2021. С. 234-243.

123. Stulov A., Tikhonov A.I., Snitko I.S. Fundamentals of Artificial Intelligence in Power Transformers Smart Design // International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). 2020: материалы конференции, 22-24 сентября, г. Челябинск. – Челябинск: ЮУрГУ. – 2020. – С.34 – 38.

## Приложения

П1. Определение основного магнитного потока с учетом и без учета анизотропии материала, а также с учетом и без учета технологических отверстий

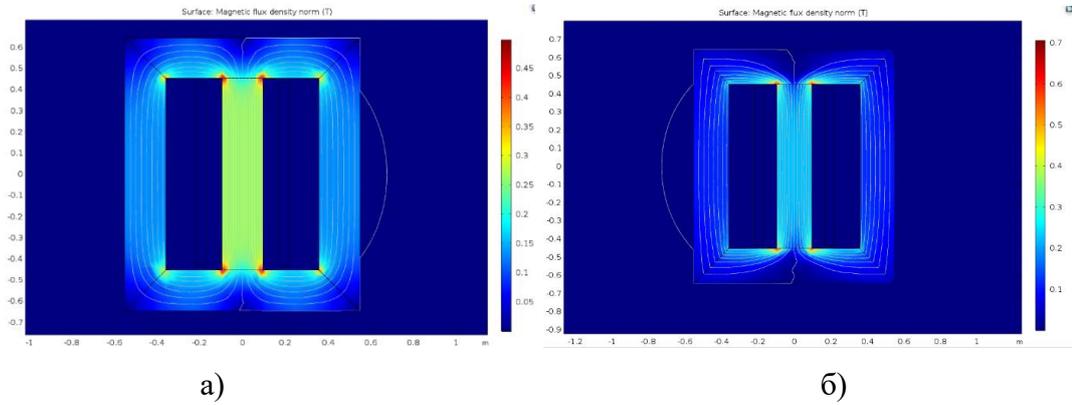


Рис. П1.1. Определение основного магнитного потока без учета анизотропии материала (а) и с учетом анизотропии (б) (2D)

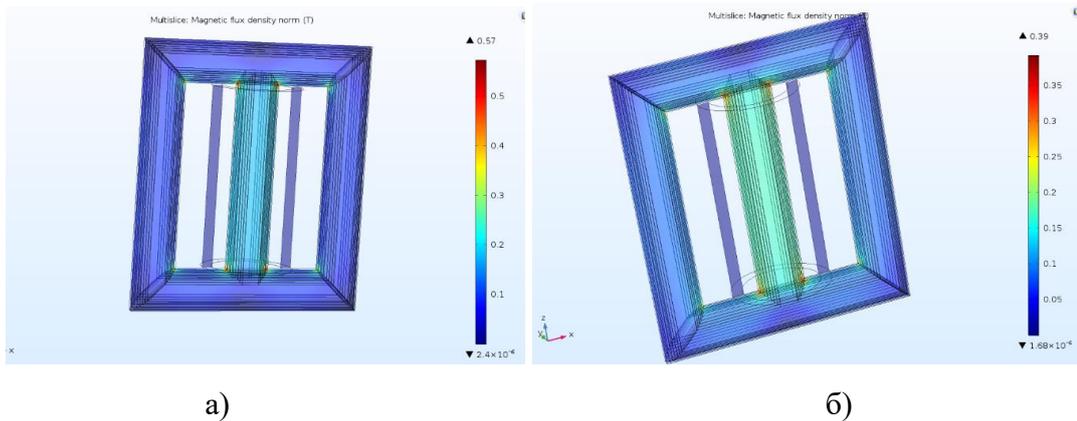


Рис. П1.2. Определение основного магнитного потока без учета анизотропии материала (а) и с учетом анизотропии (б) (3D)

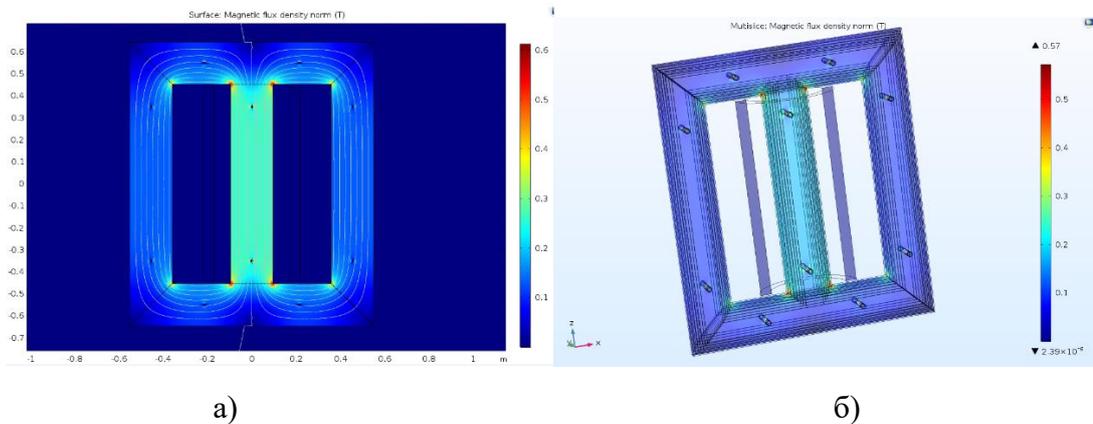


Рис. П1.3. Результат расчета магнитного поля СТ с учетом технологических отверстий в двух- (а) и трехмерной (б) постановке задачи

П2. Серия расчетов для двух соосных катушек индуктивности при двух- и трехмерной постановке задачи

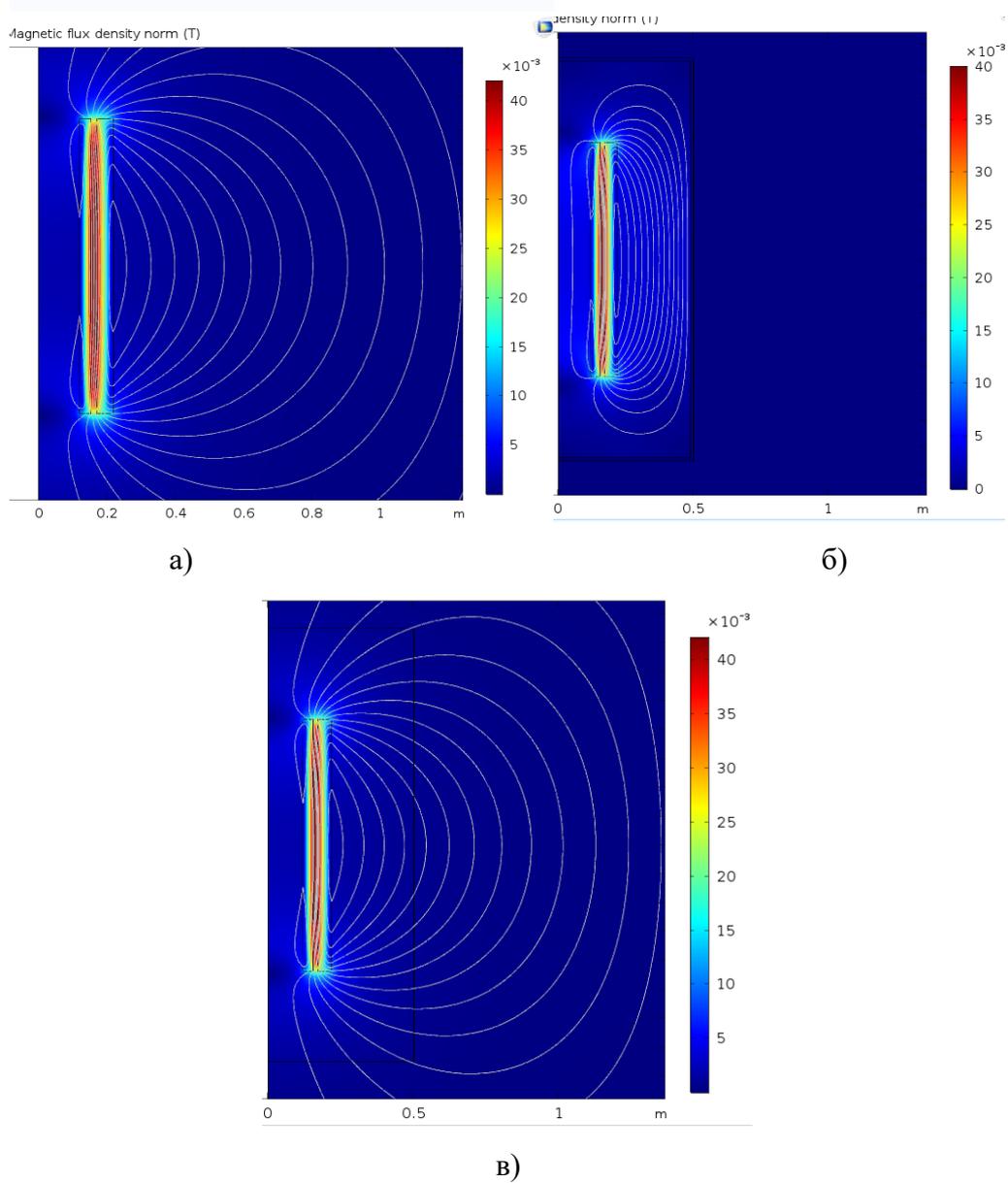


Рис. П2.1. Две соосные катушки индуктивности без сердечника в двухмерной осесимметричной постановке задачи: а – без бака; б – с условием Дирихле; в – с условием Неймана

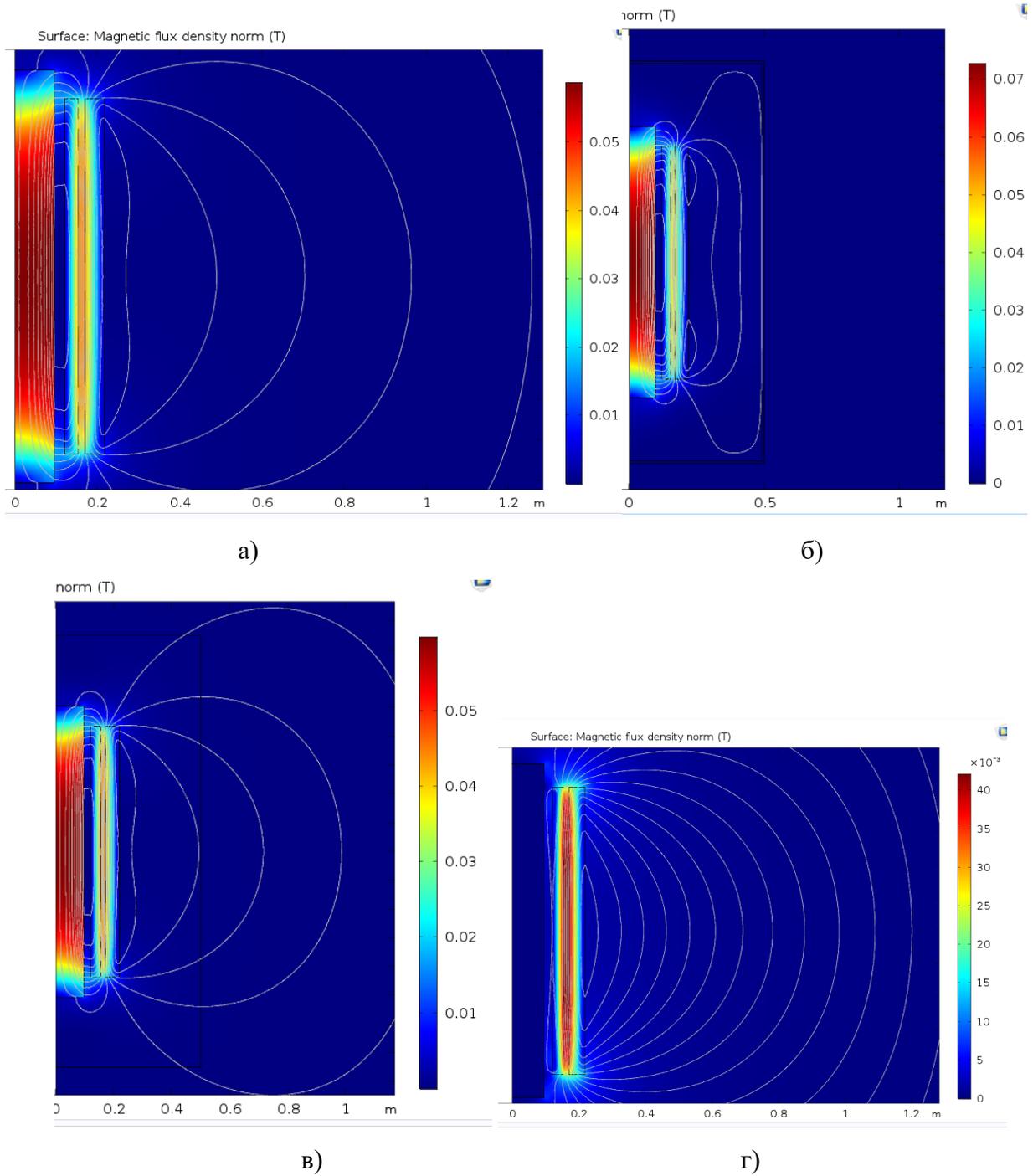
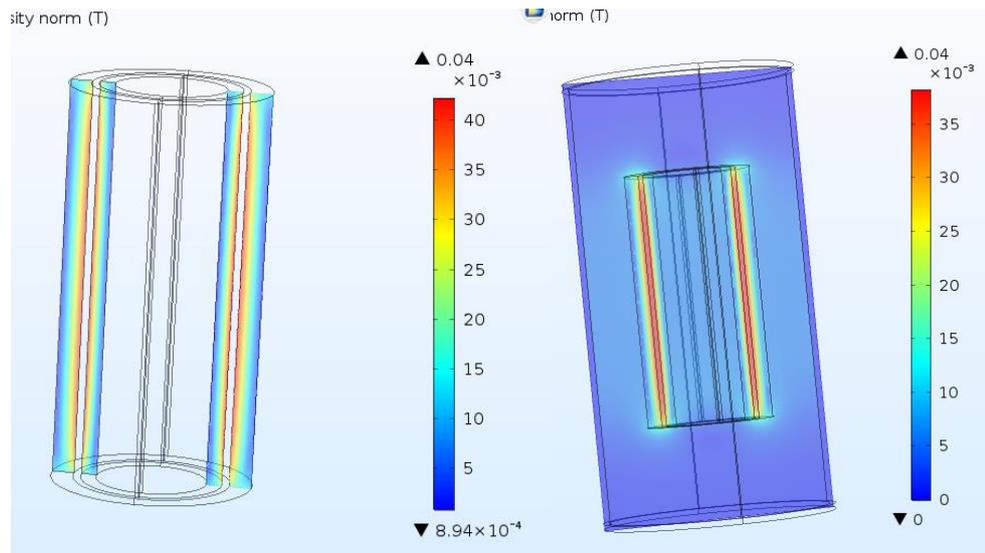
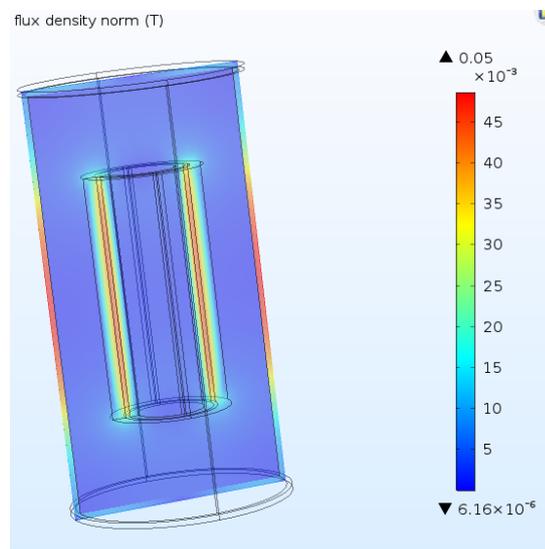


Рис. П2.2. Две соосные катушки индуктивности с ферромагнитным сердечником в двухмерной постановке задачи: а – без бака; б – с условием Дирихле; в – с условием Неймана; г – с исключенным сердечником



a)

б)



в)

Рис. П2.3. Две соосные катушки в трехмерной постановке задачи: а – без бака; б – с условием Дирихле; в – с условием Неймана

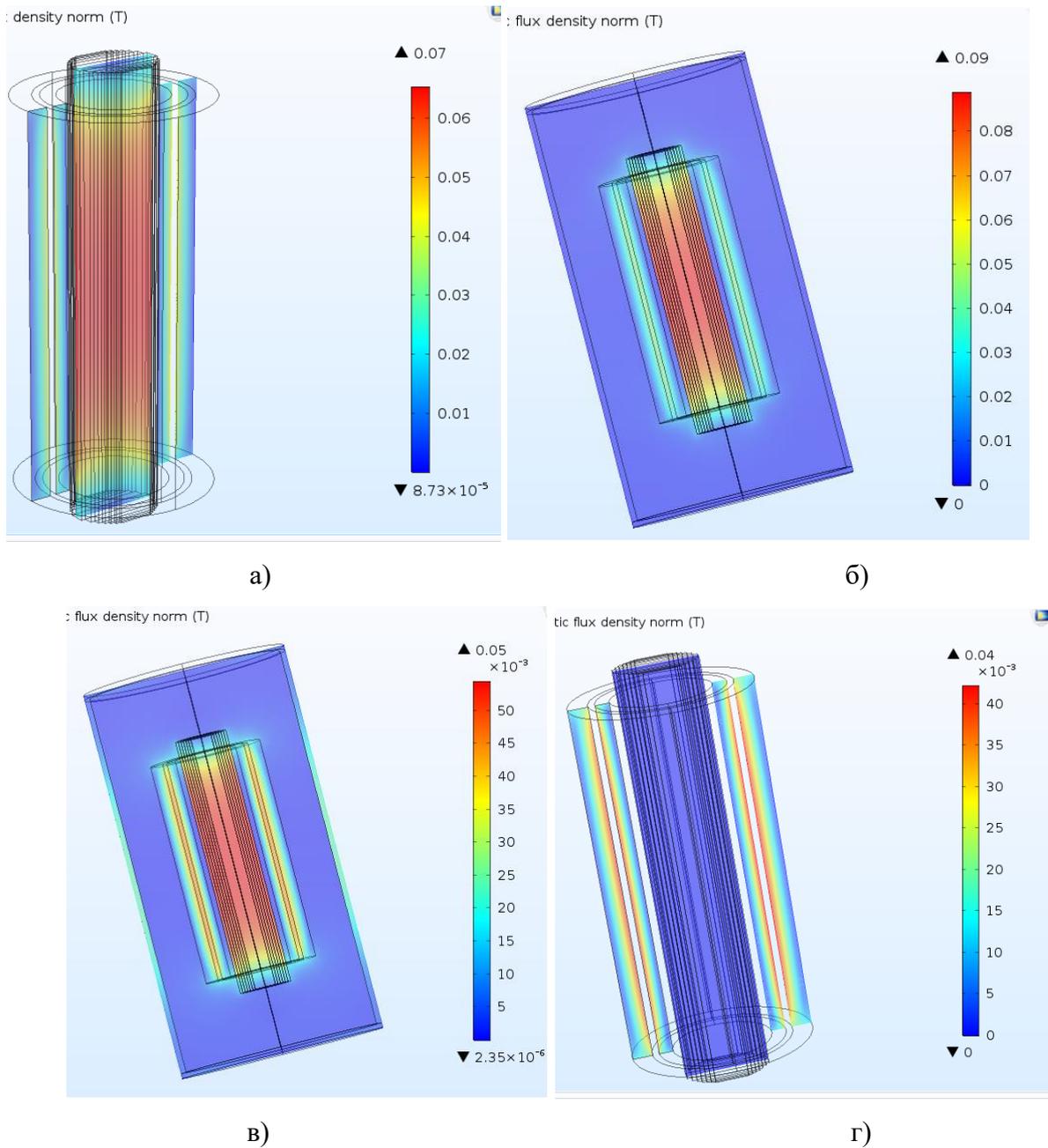


Рис. П2.4. Две соосные катушки с ферромагнитным сердечником в трехмерной постановке задачи: а – без бака; б – с условием Дирихле; в – с условием Неймана; г – с исключенным сердечником

ПЗ. Распространение магнитного поля в баке и области, близкой к нему для различных граничных условий на разных частотах

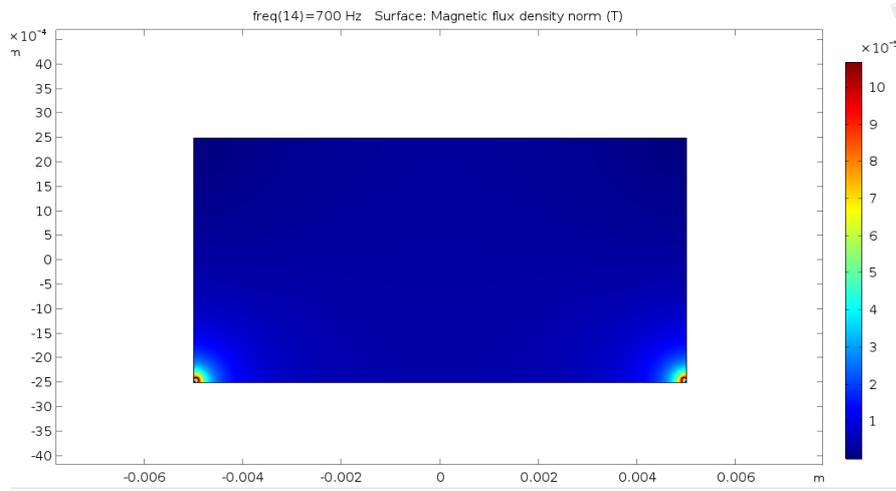


Рис. 3.1. Картина распространения поля в области бака с учетом вихревых токов при частоте 50 Гц (граничное условие Неймана)

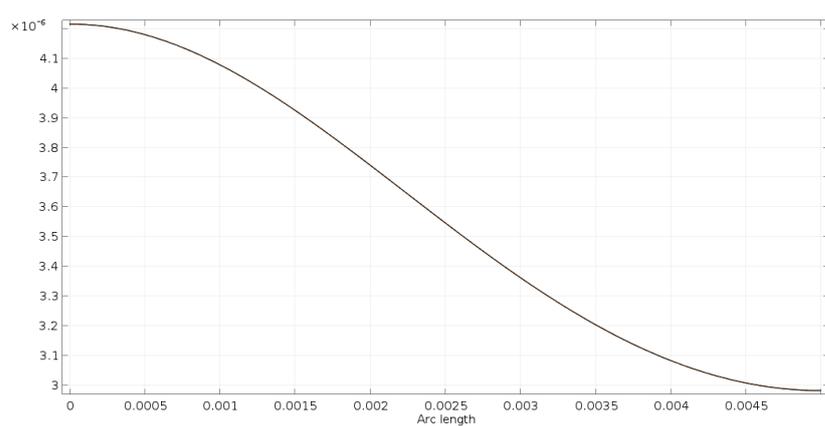


Рис. 3.2. Графики распределения индукции на оси симметрии расчетной области при частотах от 50 до 700 Гц (граничное условие Неймана)

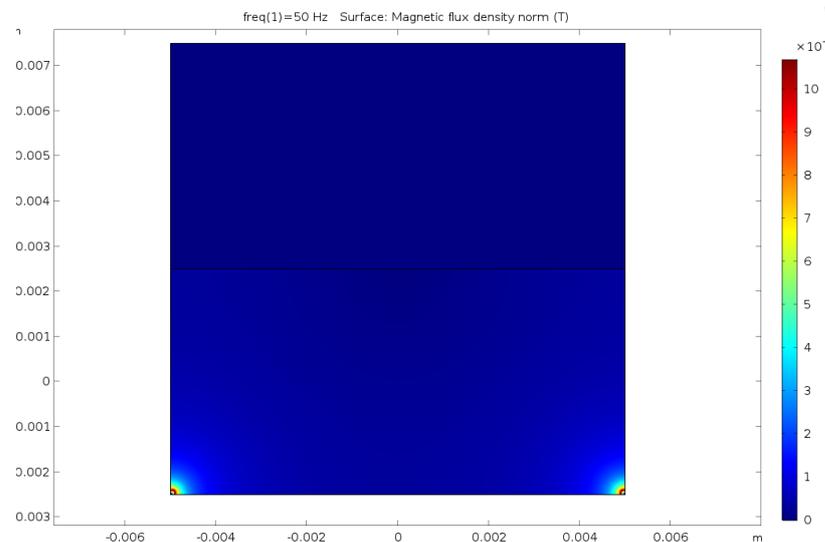


Рис. ПЗ.3. Картина распространения поля при 50 Гц (граница Дирихле)

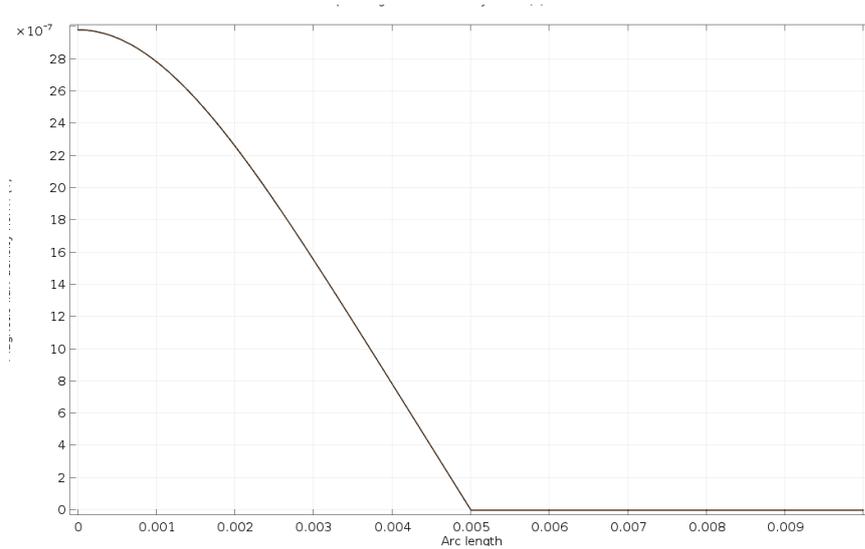


Рис. ПЗ.4. Распределение индукции на оси симметрии модели при частотах от 50 до 700 Гц (граница Дирихле)

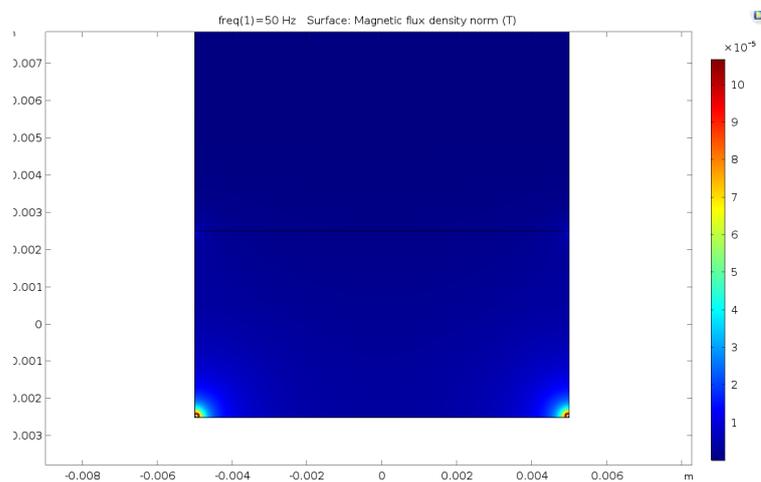


Рис. ПЗ.5. Картина распространения поля при 50 Гц (открытая задача)

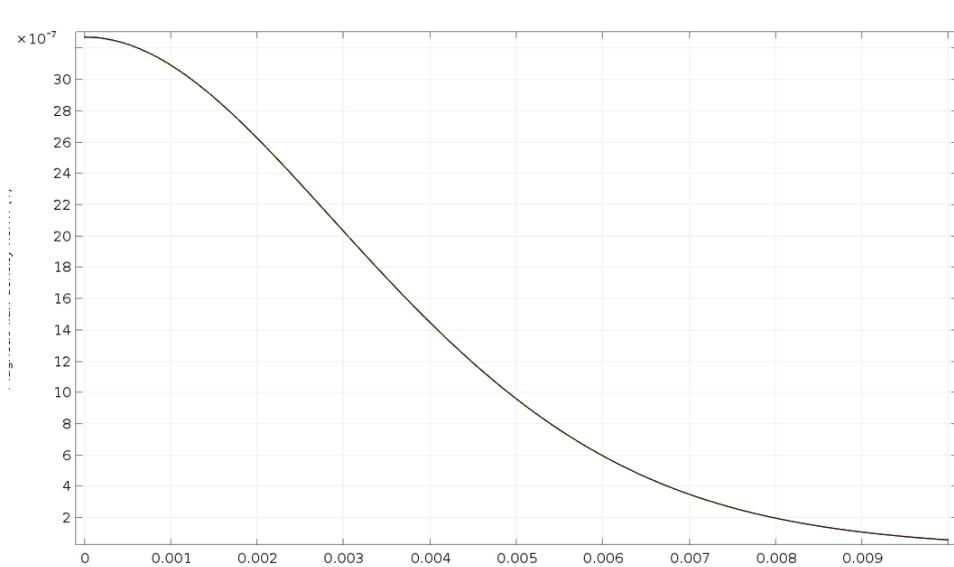


Рис. ПЗ.6. Распределение индукции на оси симметрии при частотах от 50 до 700 Гц (открытая задача)

П4. Зависимость потерь в стенке бака от индукции возле стенки для разных частот

Таблица П4.1. Зависимость потерь в стенке бака от индукции возле стенки для разных частот

Част.	50 Гц		100 Гц		150 Гц		200 Гц		250 Гц	
	В, Тл	Р, Вт/м <sup>3</sup>								
Величина	5,75E-08	2,54E-11	6,05E-08	7,60E-11	6,28E-08	1,38E-10	6,47E-08	2,11E-10	6,64E-08	2,94E-10
	1,15E-07	1,01E-10	1,21E-07	3,04E-10	1,26E-07	5,52E-10	1,29E-07	8,43E-10	1,33E-07	1,18E-09
	2,30E-07	4,06E-10	2,42E-07	1,22E-09	2,51E-07	2,21E-09	2,59E-07	3,37E-09	2,66E-07	4,70E-09
	2,88E-07	6,34E-10	3,02E-07	1,90E-09	3,14E-07	3,45E-09	3,23E-07	5,27E-09	3,32E-07	7,35E-09
	4,03E-07	1,24E-09	4,23E-07	3,72E-09	4,39E-07	6,76E-09	4,53E-07	1,03E-08	4,65E-07	1,44E-08
	5,18E-07	2,05E-09	5,44E-07	6,16E-09	5,65E-07	1,12E-08	5,82E-07	1,71E-08	5,97E-07	2,38E-08
	6,33E-07	3,07E-09	6,65E-07	9,19E-09	6,90E-07	1,67E-08	7,11E-07	2,55E-08	7,30E-07	3,56E-08
	8,05E-07	4,97E-09	8,47E-07	1,49E-08	8,79E-07	2,70E-08	9,05E-07	4,13E-08	9,29E-07	5,76E-08
	1,04E-06	8,22E-09	1,09E-06	2,46E-08	1,13E-06	4,47E-08	1,16E-06	6,83E-08	1,19E-06	9,52E-08
	1,50E-06	1,71E-08	1,57E-06	5,14E-08	1,63E-06	9,32E-08	1,68E-06	1,43E-07	1,73E-06	1,99E-07
	1,73E-06	2,28E-08	1,81E-06	6,84E-08	1,88E-06	1,24E-07	1,94E-06	1,90E-07	1,99E-06	2,64E-07
	2,30E-06	4,06E-08	2,42E-06	1,22E-07	2,51E-06	2,21E-07	2,59E-06	3,37E-07	2,66E-06	4,70E-07
	3,16E-06	7,67E-08	3,33E-06	2,30E-07	3,45E-06	4,17E-07	3,56E-06	6,38E-07	3,65E-06	8,89E-07
	4,03E-06	1,24E-07	4,23E-06	3,72E-07	4,39E-06	6,76E-07	4,53E-06	1,03E-06	4,65E-06	1,44E-06
	5,75E-06	2,54E-07	6,05E-06	7,60E-07	6,28E-06	1,38E-06	6,47E-06	2,11E-06	6,64E-06	2,94E-06
	8,63E-06	5,71E-07	9,07E-06	1,71E-06	9,41E-06	3,10E-06	9,70E-06	4,74E-06	9,96E-06	6,61E-06
	1,73E-05	2,28E-06	1,81E-05	6,84E-06	1,88E-05	1,24E-05	1,94E-05	1,90E-05	1,99E-05	2,64E-05
	2,59E-05	5,14E-06	2,72E-05	1,54E-05	2,82E-05	2,79E-05	2,91E-05	4,27E-05	2,99E-05	5,95E-05
	4,03E-05	1,24E-05	4,23E-05	3,72E-05	4,39E-05	6,76E-05	4,53E-05	1,03E-04	4,65E-05	1,44E-04
	5,75E-05	2,54E-05	6,05E-05	7,60E-05	6,28E-05	1,38E-04	6,47E-05	2,11E-04	6,64E-05	2,94E-04
	2,88E-04	6,34E-04	3,02E-04	0,0018997	3,14E-04	0,0034486	3,23E-04	0,0052709	3,32E-04	0,007345
	4,60E-04	0,001623	4,84E-04	0,0048633	5,02E-04	0,0088283	5,17E-04	0,013493	5,31E-04	0,018804
	6,33E-04	0,0030685	6,65E-04	0,0091947	6,90E-04	0,016691	7,11E-04	0,025511	7,30E-04	0,035551
	8,63E-04	0,0057058	9,07E-04	0,017098	9,41E-04	0,031037	9,70E-04	0,047438	9,96E-04	0,066106
	0,0010927	0,0091546	0,0011493	0,027432	0,0011924	0,049797	0,0012285	0,076111	0,0012613	0,10606
	0,0015527	0,018487	0,0016332	0,055396	0,0016945	0,10056	0,0017458	0,1537	0,0017924	0,21418
	0,0020128	0,031065	0,0021172	0,093087	0,0021966	0,16898	0,0022631	0,25827	0,0023235	0,35991
	0,0025879	0,051352	0,0027221	0,15388	0,0028242	0,27933	0,0029097	0,42694	0,0029874	0,59496
	0,0031629	0,076711	0,003327	0,22987	0,0034518	0,41728	0,0035563	0,63778	0,0036512	0,88876
	0,003738	0,10714	0,0039319	0,32106	0,0040794	0,58281	0,0042029	0,89078	0,0043151	1,2413
0,0043131	0,14264	0,0045368	0,42744	0,004707	0,77593	0,0048495	1,1859	0,0049789	1,6527	
0,0051757	0,20541	0,0054442	0,61551	0,0056484	1,1173	0,0058194	1,7078	0,0059747	2,3798	
0,0086262	0,57058	0,0090736	1,7098	0,009414	3,1037	0,009699	4,7438	0,0099578	6,6106	
0,057508	25,359	0,060491	75,989	0,06276	137,94	0,06466	210,83	0,066386	293,81	
0,086262	57,058	0,090736	170,98	0,09414	310,37	0,09699	474,38	0,099578	661,06	
0,11502	101,44	0,12098	303,96	0,12552	551,77	0,12932	843,34	0,13277	1175,2	
Част.	300 Гц		350 Гц		400 Гц		450 Гц		500 Гц	

Пар-р	В, Тл	Р, Вт/м <sup>3</sup>	В, Тл	Р, Вт/м <sup>3</sup>	В, Тл	Р, Вт/м <sup>3</sup>	В, Тл	Р, Вт/м <sup>3</sup>	В, Тл	Р, Вт/м <sup>3</sup>
	Величина	6,80E-08	3,86E-10	6,95E-08	4,85E-10	7,10E-08	5,92E-10	7,24E-08	7,05E-10	7,37E-08
1,36E-07		1,54E-09	1,39E-07	1,94E-09	1,42E-07	2,37E-09	1,45E-07	2,82E-09	1,47E-07	3,30E-09
2,72E-07		6,17E-09	2,78E-07	7,76E-09	2,84E-07	9,47E-09	2,89E-07	1,13E-08	2,95E-07	1,32E-08
3,40E-07		9,64E-09	3,48E-07	1,21E-08	3,55E-07	1,48E-08	3,62E-07	1,76E-08	3,68E-07	2,06E-08
4,76E-07		1,89E-08	4,87E-07	2,38E-08	4,97E-07	2,90E-08	5,06E-07	3,46E-08	5,16E-07	4,04E-08
6,12E-07		3,12E-08	6,26E-07	3,93E-08	6,39E-07	4,80E-08	6,51E-07	5,71E-08	6,63E-07	6,68E-08
7,48E-07		4,67E-08	7,65E-07	5,87E-08	7,81E-07	7,16E-08	7,96E-07	8,54E-08	8,10E-07	9,98E-08
9,52E-07		7,56E-08	9,73E-07	9,51E-08	9,94E-07	1,16E-07	1,01E-06	1,38E-07	1,03E-06	1,62E-07
1,22E-06		1,25E-07	1,25E-06	1,57E-07	1,28E-06	1,92E-07	1,30E-06	2,29E-07	1,33E-06	2,67E-07
1,77E-06		2,61E-07	1,81E-06	3,28E-07	1,85E-06	4,00E-07	1,88E-06	4,77E-07	1,92E-06	5,58E-07
2,04E-06		3,47E-07	2,09E-06	4,37E-07	2,13E-06	5,33E-07	2,17E-06	6,35E-07	2,21E-06	7,42E-07
2,72E-06		6,17E-07	2,78E-06	7,76E-07	2,84E-06	9,47E-07	2,89E-06	1,13E-06	2,95E-06	1,32E-06
3,74E-06		1,17E-06	3,82E-06	1,47E-06	3,90E-06	1,79E-06	3,98E-06	2,13E-06	4,05E-06	2,50E-06
4,76E-06		1,89E-06	4,87E-06	2,38E-06	4,97E-06	2,90E-06	5,06E-06	3,46E-06	5,16E-06	4,04E-06
6,80E-06		3,86E-06	6,95E-06	4,85E-06	7,10E-06	5,92E-06	7,24E-06	7,05E-06	7,37E-06	8,25E-06
1,02E-05		8,68E-06	1,04E-05	1,09E-05	1,06E-05	1,33E-05	1,09E-05	1,59E-05	1,11E-05	1,86E-05
2,04E-05		3,47E-05	2,09E-05	4,37E-05	2,13E-05	5,33E-05	2,17E-05	6,35E-05	2,21E-05	7,42E-05
3,06E-05		7,81E-05	3,13E-05	9,83E-05	3,19E-05	1,20E-04	3,26E-05	1,43E-04	3,32E-05	1,67E-04
4,76E-05		1,89E-04	4,87E-05	2,38E-04	4,97E-05	2,90E-04	5,06E-05	3,46E-04	5,16E-05	4,04E-04
6,80E-05		3,86E-04	6,95E-05	4,85E-04	7,10E-05	5,92E-04	7,24E-05	7,05E-04	7,37E-05	8,25E-04
3,40E-04		0,0096405	3,48E-04	0,012132	3,55E-04	0,014801	3,62E-04	0,017635	3,68E-04	0,020623
5,44E-04		0,02468	5,56E-04	0,031057	5,68E-04	0,03789	5,79E-04	0,045145	5,89E-04	0,052795
7,48E-04		0,04666	7,65E-04	0,058718	7,81E-04	0,071636	7,96E-04	0,085351	8,10E-04	0,099816
0,00102		0,086765	0,0010429	0,10919	0,0010646	0,13321	0,0010853	0,15871	0,0011051	0,18561
0,001292		0,13921	0,001321	0,17518	0,0013485	0,21372	0,0013747	0,25464	0,0013998	0,2978
0,001836		0,28112	0,0018771	0,35376	0,0019162	0,43159	0,0019535	0,51422	0,0019893	0,60137
0,00238		0,47239	0,0024333	0,59446	0,002484	0,72524	0,0025323	0,8641	0,0025787	1,0105
0,00306		0,78088	0,0031286	0,98267	0,0031937	1,1989	0,0032559	1,4284	0,0033154	1,6705
0,00374		1,1665	0,0038238	1,4679	0,0039034	1,7909	0,0039794	2,1338	0,0040522	2,4954
0,00442		1,6292	0,004519	2,0503	0,0046131	2,5013	0,0047029	2,9802	0,0047889	3,4853
0,0051	2,1691	0,0052143	2,7296	0,0053229	3,3302	0,0054264	3,9678	0,0055257	4,6402	
0,00612	3,1235	0,0062571	3,9307	0,0063874	4,7955	0,0065117	5,7136	0,0066308	6,6819	
0,0102	8,6765	0,010429	10,919	0,010646	13,321	0,010853	15,871	0,011051	18,561	
0,068	385,62	0,069524	485,27	0,070971	592,03	0,072353	705,38	0,073676	824,92	
0,102	867,65	0,10429	1091,9	0,10646	1332,1	0,10853	1587,1	0,11051	1856,1	
0,136	1542,5	0,13905	1941,1	0,14194	2368,1	0,14471	2821,5	0,14735	3299,7	
Част.	550 Гц		600 Гц			650 Гц		700 Гц		
Пар-р	В, Тл	Р, Вт/м <sup>3</sup>	В, Тл	Р, Вт/м <sup>3</sup>	В, Тл	Р, Вт/м <sup>3</sup>	В, Тл	Р, Вт/м <sup>3</sup>	В, Тл	Р, Вт/м <sup>3</sup>
Величина	7,49E-08	9,50E-10	7,62E-08	1,08E-09	7,74E-08	1,22E-09	7,85E-08	1,36E-09	7,96E-08	1,50E-09
	1,50E-07	3,80E-09	1,52E-07	4,33E-09	1,55E-07	4,87E-09	1,57E-07	5,44E-09	1,60E-07	6,08E-09
	3,00E-07	1,52E-08	3,05E-07	1,73E-08	3,09E-07	1,95E-08	3,14E-07	2,17E-08	3,18E-07	2,40E-08
	3,75E-07	2,38E-08	3,81E-07	2,70E-08	3,87E-07	3,04E-08	3,93E-07	3,40E-08	3,98E-07	4,56E-08
	5,25E-07	4,66E-08	5,33E-07	5,30E-08	5,42E-07	5,97E-08	5,50E-07	6,66E-08	5,58E-07	6,66E-08
	6,75E-07	7,70E-08	6,86E-07	8,76E-08	6,96E-07	9,86E-08	7,07E-07	1,10E-07	7,17E-07	1,22E-07
	8,24E-07	1,15E-07	8,38E-07	1,31E-07	8,51E-07	1,47E-07	8,64E-07	1,64E-07	8,77E-07	1,81E-07

1,05E-06	1,86E-07	1,07E-06	2,12E-07	1,08E-06	2,39E-07	1,10E-06	2,66E-07
1,35E-06	3,08E-07	1,37E-06	3,50E-07	1,39E-06	3,94E-07	1,41E-06	4,40E-07
1,95E-06	6,42E-07	1,98E-06	7,31E-07	2,01E-06	8,23E-07	2,04E-06	9,19E-07
2,25E-06	8,55E-07	2,29E-06	9,73E-07	2,32E-06	1,10E-06	2,36E-06	1,22E-06
3,00E-06	1,52E-06	3,05E-06	1,73E-06	3,09E-06	1,95E-06	3,14E-06	2,17E-06
4,12E-06	2,87E-06	4,19E-06	3,27E-06	4,26E-06	3,68E-06	4,32E-06	4,11E-06
5,25E-06	4,66E-06	5,33E-06	5,30E-06	5,42E-06	5,97E-06	5,50E-06	6,66E-06
7,49E-06	9,50E-06	7,62E-06	1,08E-05	7,74E-06	1,22E-05	7,85E-06	1,36E-05
1,12E-05	2,14E-05	1,14E-05	2,43E-05	1,16E-05	2,74E-05	1,18E-05	3,06E-05
2,25E-05	8,55E-05	2,29E-05	9,73E-05	2,32E-05	1,10E-04	2,36E-05	1,22E-04
3,37E-05	1,92E-04	3,43E-05	2,19E-04	3,48E-05	2,47E-04	3,53E-05	2,75E-04
5,25E-05	4,66E-04	5,33E-05	5,30E-04	5,42E-05	5,97E-04	5,50E-05	6,66E-04
7,49E-05	9,50E-04	7,62E-05	0,0010813	7,74E-05	0,0012176	7,85E-05	0,0013589
3,75E-04	0,023758	3,81E-04	0,027032	3,87E-04	0,030439	3,93E-04	0,033973
6,00E-04	0,06082	6,09E-04	0,069202	6,19E-04	0,077923	6,28E-04	0,08697
8,24E-04	0,11499	8,38E-04	0,13083	8,51E-04	0,14732	8,64E-04	0,16443
0,0011242	0,21382	0,0011427	0,24329	0,0011605	0,27395	0,0011778	0,30575
0,001424	0,34306	0,0014474	0,39034	0,00147	0,43954	0,0014919	0,49057
0,0020236	0,69278	0,0020568	0,78825	0,0020889	0,8876	0,0021201	0,99065
0,0026232	1,1641	0,0026662	1,3246	0,0027079	1,4915	0,0027483	1,6647
0,0033727	1,9244	0,003428	2,1896	0,0034816	2,4655	0,0035335	2,7518
0,0041222	2,8747	0,0041898	3,2709	0,0042552	3,6831	0,0043187	4,1107
0,0048717	4,0151	0,0049516	4,5684	0,0050289	5,1442	0,0051039	5,7414
0,0056212	5,3455	0,0057134	6,0822	0,0058026	6,8487	0,0058891	7,6439
0,0067454	7,6976	0,0068561	8,7584	0,0069631	9,8622	0,007067	11,007
0,011242	21,382	0,011427	24,329	0,011605	27,395	0,011778	30,575
0,074949	950,32	0,076178	1081,3	0,077368	1217,6	0,078522	1358,9
0,11242	2138,2	0,11427	2432,9	0,11605	2739,5	0,11778	3057,5
0,1499	3801,3	0,15236	4325,1	0,15474	4870,2	0,15704	5435,6

## П5. Построение математических моделей СТ

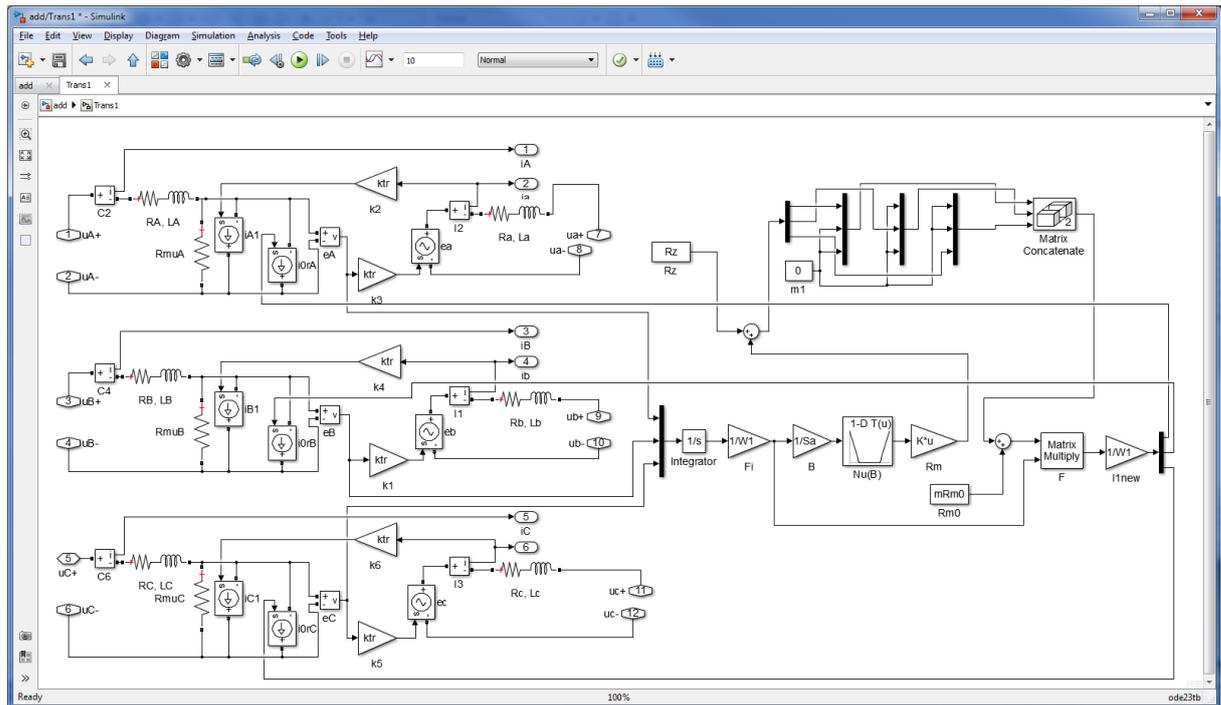


Рис. П5.1. Динамическая модель трехфазного двухобмоточного трансформатора без учета взаимного влияния полей рассеяния

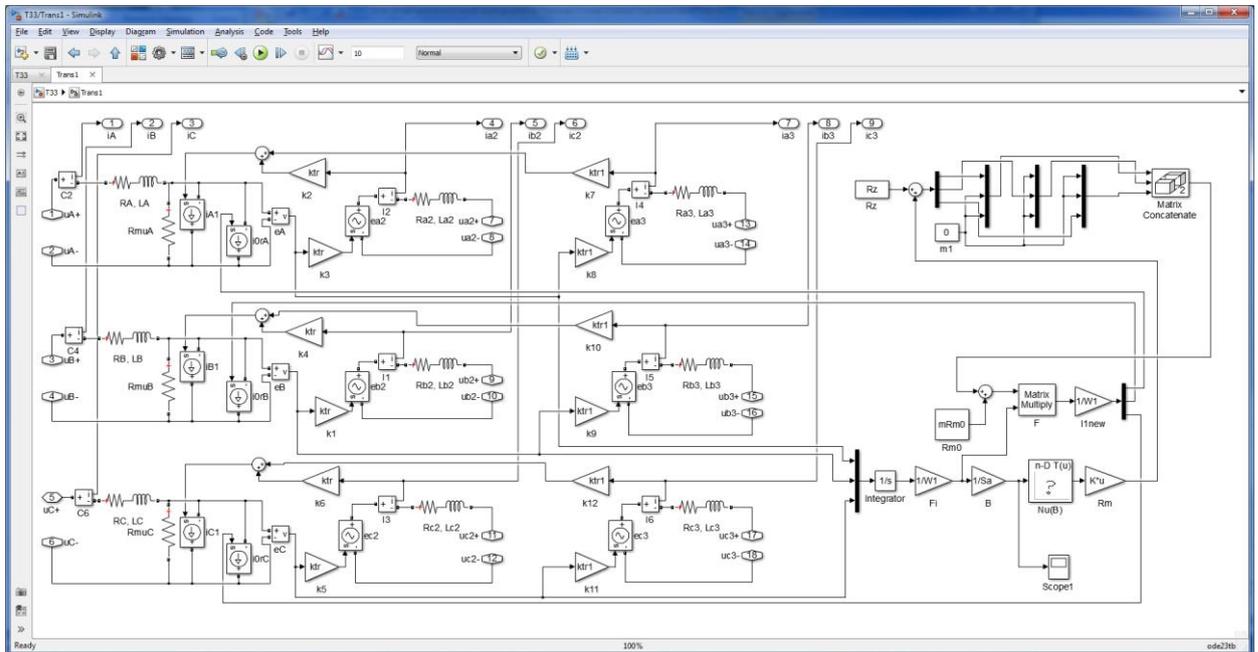


Рис. П5.2. Динамическая модель трехфазного трехобмоточного трансформатора без учета взаимного влияния полей рассеяния

П6. Текст программы для расчета статических режимов работы СТ (для режима трехфазного КЗ)

Подпрограмма для создания и вызова диалогового окна

```
function TransAnalysis
%=====
% Создание окна
%=====
global hm1 hm2 hm3 hm11 hm12 hm13 hm14;
global he1 he2 he3 he4 he5 he6 he7 he8 he9 he11 he12 he13 he14 he15;
global he16 he17 he18;
global m0;
m0=4*pi*10^(-7);
%=====
hf = figure;
%Координаты окна
fx = 100; fy = 300; fw = 800; fh = 500;
%Заголовок окна
set(hf,'Name','Система исследования установившихся режимов трехфазного трансформатора', ...
    'Position',[fx fy fw fh]);
%Опции окна
set(hf,'NumberTitle','off','MenuBar','none','Resize','off');
%=====
% Меню
%=====
hm1 = uimenu('Label','Файл');
    hm11 = uimenu(hm1,'Label','Обнулить данные','Callback',{@new});
    hm12 = uimenu(hm1,'Label','Читать файл данных ...','Callback',@open);
    hm13 = uimenu(hm1,'Label','Сохранить как ...','Enable','off','Callback',{@save_as});
    hm14 = uimenu(hm1,'Label','Выход','Callback',{@fexit},'Separator','on');
hm2 = uimenu('Label','Расчет','Enable','on');
    hm21 = uimenu(hm2,'Label','Расчет режима нагрузки','Callback',@CalcNagr);
    hm22 = uimenu(hm2,'Label','Расчет режима однофазного КЗ','Callback',@CalcKZ1);
    hm23 = uimenu(hm2,'Label','Расчет режима трехфазного КЗ','Callback',@CalcKZ3);
```

```

hm3 = uimenu('Label','Помощь','Callback',@help);
x = 10; y = 470; xe = 250;
ht1 = uicontrol('Style','text','Position',[x y 250 20], ...
    'String','Активное сопротивление обмотки ВН, Ом:');
he1 = uicontrol('Style','edit','Position',[x+xe y 70 20], ...
    'String','7.27','Enable','on');
ht2 = uicontrol('Style','text','Position',[x y-30 250 20], ...
    'String','Активное сопротивление обмотки НН, Ом:');
he2 = uicontrol('Style','edit','Position',[x+xe y-30 70 20], ...
    'String','0.002031','Enable','on');
ht3 = uicontrol('Style','text','Position',[x y-60 250 20], ...
    'String','Индуктивность обмотки ВН, Гн:');
he3 = uicontrol('Style','edit','Position',[x+xe y-60 70 20], ...
    'String','0.16356','Enable','on');
ht4 = uicontrol('Style','text','Position',[x y-90 250 20], ...
    'String','Индуктивность обмотки НН, Гн:');
he4 = uicontrol('Style','edit','Position',[x+xe y-90 70 20], ...
    'String','0.0000021371','Enable','on');
ht5 = uicontrol('Style','text','Position',[x y-120 250 20], ...
    'String','Взаимная индуктивность обмоток ВН-НН, Гн:');
he5 = uicontrol('Style','edit','Position',[x+xe y-120 70 20], ...
    'String','0.0016539','Enable','on');
ht6 = uicontrol('Style','text','Position',[x y-150 250 20], ...
    'String','Проводимость поля рассеяния, См:');
he6 = uicontrol('Style','edit','Position',[x+xe y-150 70 20], ...
    'String','0.000000337325','Enable','on');
ht7 = uicontrol('Style','text','Position',[x y-180 250 20], ...
    'String','Линейное напряжение, В:');
he7 = uicontrol('Style','edit','Position',[x+xe y-180 70 20], ...
    'String','10000','Enable','on');
ht8 = uicontrol('Style','text','Position',[x y-210 250 20], ...
    'String','Число витков первичной обмотки:');
he8 = uicontrol('Style','edit','Position',[x+xe y-210 70 20], ...
    'String','866','Enable','on');
ht9 = uicontrol('Style','text','Position',[x y-240 250 20], ...

```

```

    'String', 'Число витков вторичной обмотки:');
he9 = uicontrol('Style','edit','Position',[x+xe y-240 70 20], ...
    'String','20','Enable','on');
ht10 = uicontrol('Style','text','Position',[x y-270 250 20], ...
    'String','Параметры магнитопровода:');
ht11 = uicontrol('Style','text','Position',[x y-300 300 20], ...
    'String','Плотность стали:');
he11 = uicontrol('Style','edit','Position',[x+xe y-300 70 20], ...
    'String','7200','Enable','on');
ht12 = uicontrol('Style','text','Position',[x y-330 250 20], ...
    'String','Площадь поперечного сечения стержня:');
he12 = uicontrol('Style','edit','Position',[x+xe y-330 70 20], ...
    'String','0.030066','Enable','on');
ht13 = uicontrol('Style','text','Position',[x y-360 250 20], ...
    'String','Длина средней линии участка 1, м:');
he13 = uicontrol('Style','edit','Position',[x+xe y-360 70 20], ...
    'String','2.6914','Enable','on');
ht14 = uicontrol('Style','text','Position',[x y-390 250 20], ...
    'String','Длина средней линии участка 2, м:');
he14 = uicontrol('Style','edit','Position',[x+xe y-390 70 20], ...
    'String','0.7638','Enable','on');
ht15 = uicontrol('Style','text','Position',[x y-420 250 20], ...
    'String','Длина средней линии участка 3, м:');
he15 = uicontrol('Style','edit','Position',[x+xe y-420 70 20], ...
    'String','2.6914','Enable','on');
ht16 = uicontrol('Style','text','Position',[x+1.5*xe y 250 20], ...
    'String','Сопротивление нагрузки фазы А, Ом:');
he16 = uicontrol('Style','edit','Position',[x+2.5*xe y 70 20], ...
    'String','0.277','Enable','on');
ht17 = uicontrol('Style','text','Position',[x+1.5*xe y-30 250 20], ...
    'String','Сопротивление нагрузки фазы В, Ом:');
he17 = uicontrol('Style','edit','Position',[x+2.5*xe y-30 70 20], ...
    'String','0.277','Enable','on');
ht18 = uicontrol('Style','text','Position',[x+1.5*xe y-60 250 20], ...
    'String','Сопротивление нагрузки фазы С, Ом:');

```

```

he18 = uicontrol('Style','edit','Position',[x+2.5*xe y-60 70 20], ...
                'String','0.277','Enable','on');
return

function new(hObject, eventdata)
    global hm13;
    set(hm13,'Enable','off');
return

function open(hObject, eventdata)
    global hm13;
    set(hm13,'Enable','on');
return

function save_as(hObject, eventdata)
return

function help(hObject, eventdata)
return

function fexit(hObject, eventdata)
    %finish;
return

Подпрограмма для расчета режима трехфазного КЗ:
function CalcKZ3(hObject, eventdata)
    % Исходные данные
    global N J Itr Y1 Y2 Y3 Ysig A C R Eab Ebc L f Zseti S B0 Itrmod Itryg i m0
    global he1 he2 he3 he4 he5 he6 he7 he8 he9 he11 he12 he13 he14 he15;
    f=50; %Гц. Частота
    i=(-1)^0.5;
    RA = str2double(get(he1,'String')); %Ом. Активное сопротивление обмотки ВН
    RB=RA; RC=RA;
    Ra = str2double(get(he2,'String')); %Ом. Активное сопротивление обмотки НН
    Rb=Ra; Rc=Ra;
    LA=str2double(get(he3,'String')); %Гн. Индуктивность обмотки ВН

```

```

LB=LA; LC=LA;
La=str2double(get(he4,'String')); %Гн. Индуктивность обмотки НН
Lb=La; Lc=La;
LAa = str2double(get(he5,'String'));
LBb = LAa; LCc = LAa;
Ysig=str2double(get(he6,'String')); %Проводимость поля рассеяния
Eab=str2double(get(he7,'String')); %В. ЭДС
Ebc=Eab*exp(i*(-120*pi/180));
wA=str2double(get(he8,'String')); wB=wA; wC=wA; %Число витков первичной обмотки
wa=str2double(get(he9,'String')); wb=wa; wc=wa; %Число витков вторичной обмотки

%Параметры магнитопровода
%Ветвь 1
d1 = str2double(get(he11,'String'));%плотность стали
S1=str2double(get(he12,'String')); %Площадь поперечного сечения
l1=str2double(get(he13,'String')); %длина участка
%Ветвь 2
d2 = d1;%плотность стали
S2=str2double(get(he9,'String')); %Площадь поперечного сечения
l2=str2double(get(he14,'String')); %длина участка
%Ветвь 3
d3 = d1;%плотность стали
S3=str2double(get(he9,'String')); %Площадь поперечного сечения
l3=str2double(get(he15,'String')); %длина участка
S=[S1;S2;S3];

%Параметры стали
B0=[0.1; 0.2; 0.3; 0.4; 0.5; 0.6; 0.7; 0.8; 0.9; 1; 1.1; 1.2; 1.3; 1.4; 1.5; 1.6; 1.7; 1.8; 1.9; 2];
P0=[0.01; 0.025; 0.045; 0.075; 0.11; 0.15; 0.195; 0.25; 0.31; 0.375; 0.45; 0.545; 0.63; 0.725;...
    0.85; 0.995; 1.18; 1.575; 2.2; 3.2];
Q0=[0.01; 0.029; 0.064; 0.101; 0.149; 0.202; 0.26; 0.325; 0.395; 0.46; 0.54; 0.64; 0.745; 0.87;...
    1.04; 1.32; 1.85; 4.4; 23.5; 120];

Zl = 0.0001;
Zseti=[Zl Zl Zl];

```

```

%Комплексная магнитная проницаемость для каждой из ветвей
m1=(pi*f.*B0.^2)./(m0*d1.*(Q0+i.*P0));
m2=(pi*f.*B0.^2)./(m0*d2.*(Q0+i.*P0));
m3=(pi*f.*B0.^2)./(m0*d3.*(Q0+i.*P0));
%Комплексные магнитные проводимости ветвей
Y1=(m0*S1/l1).*m1;
Y2=(m0*S2/l2).*m2;
Y3=(m0*S3/l3).*m3;

%Метод узловых потенциалов
A=[-1 -1 -1 1]; %Узловая матрица
C=[wA 0 0 -wa 0 0; 0 wB 0 0 -wb 0; 0 0 wC 0 0 -wc; 0 0 0 0 0 0]; %Сингулярная матрица
преобразований
L=[LA 0 0 LAa 0 0; 0 LB 0 0 LBb 0; 0 0 LC 0 0 LCc; LAa 0 0 La 0 0; 0 LBb 0 0 Lb 0; 0 0 LCc
0 0 Lc];
R=[RA 0 0 0 0 0; 0 RB 0 0 0 0; 0 0 RC 0 0 0; 0 0 0 Ra 0 0; 0 0 0 0 Rb 0; 0 0 0 0 0 Rc];
J=[1 1 1];
raschet_kz3;
while J~=N
    J=N; raschet_kz3;
end
t=0:0.0001:0.04
figure;
itrAB = Itrmod(1)*10*2^0.5*sin(2*pi*f*t+Itryg(1)*pi/180);
itrBC = Itrmod(2)*10*2^0.5*sin(2*pi*f*t+Itryg(2)*pi/180);
itrCA = Itrmod(3)*10*2^0.5*sin(2*pi*f*t+Itryg(3)*pi/180);
itra = Itrmod(4)*2^0.5*sin(2*pi*f*t+Itryg(4)*pi/180);
itrb = Itrmod(5)*2^0.5*sin(2*pi*f*t+Itryg(5)*pi/180);
itrc = Itrmod(6)*2^0.5*sin(2*pi*f*t+Itryg(6)*pi/180);
plot(t,itrAB,t,itrBC,t,itrCA,t,itra,t,itrb,t,itrc);
disp('Модули токов обмоток трансформатора');
disp(Itrmod);
disp('--');
disp('Начальные фазы токов');

```

```
disp(Itryg);
```

```
return
```

```
function raschet_kz3
```

```
global N J Itr Y1 Y2 Y3 Ysig A C R Eab Ebc L f Zseti S B0 Itrmod Itryg i
```

```
Yk1=[Y1(J(1)) 0 0 0; 0 Y2(J(2)) 0 0; 0 0 Y3(J(3)) 0; 0 0 0 Ysig];
```

```
Yk=A*Yk1*A.;
```

```
Lk=C.*Yk1*C+L;
```

```
Zk=R+i*2*pi*f*(Lk-C.*Yk1*A.*Yk^(-1)*A*Yk1*C);
```

```
%Электрическая цепь
```

```
E=[0;0;0;0;0;0;Eab;0;-Ebc];
```

```
A1=[1 0 -1 0 0 0 -1 0 0 ; -1 1 0 0 0 0 0 -1 0 ;...
```

```
0 0 0 0 0 0 1 1 1];
```

```
Z0=zeros(3,6);Z01=zeros(6,3); Zln=diag(Zseti); %Составные части матрицы сопротивлений
```

```
Zvsp1=cat(1,Zk,Z0); Zvsp2=cat(1,Z01,Zln); %вспомогательные матрицы
```

```
Z=cat(2,Zvsp1,Zvsp2); %матрица сопротивлений
```

```
Yj=A1*Z^(-1)*A1.;
```

```
Jj=-A1*Z^(-1)*E;
```

```
F=Yj^(-1)*Jj;
```

```
U=A1.*F;
```

```
Isum=Z^(-1)*(U+E);
```

```
Itr=Isum(1:6);
```

```
Itrmod=[abs(Itr(1)); abs(Itr(2)); abs(Itr(3)); abs(Itr(4)); abs(Itr(5));...
```

```
abs(Itr(6))];
```

```
Itryg=[angle(Itr(1))*180/pi; angle(Itr(2))*180/pi; angle(Itr(3))*180/pi;...
```

```
angle(Itr(4))*180/pi;angle(Itr(5))*180/pi; angle(Itr(6))*180/pi];
```

```
Fi=2^(1/2)*Yk1*(eye(4)-A.*Yk*A*Yk1)*C*Itr;
```

```
B=Fi(1:3)./S;
```

```
Bmod=[abs(B(1)); abs(B(2)); abs(B(3))];
```

```
Byg=[angle(B(1))*180/pi; angle(B(2))*180/pi; angle(B(3))*180/pi];
```

```
%цикл для определения номеров "отрезков" индукции
```

```
for I1=1:length(Bmod)
```

```
T(I1) = round(Bmod(I1),1);
```

```
for J1=1:length(B0);  
  if T(I1)== B0(J1)  
    N(I1)=J1;  
  end  
end  
end  
return
```

## П7. Акты внедрения

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального директора  
по научной работе,  
кандидат технических наук  
А.В. Стулов



\_\_\_\_\_ /  
" 11 " января 2022 г.

## Акт

внедрения методики имитационного моделирования динамических режимов работы силовых трансформаторов

В практику научных исследований и проектирования силовых трансформаторов на ООО «НПК «АВТОПРИБОР» внедряется методика имитационного моделирования силовых трансформаторов, позволяющая реализовать численное исследование установившихся и переходных режимов работы с учетом возможной несимметрии в нормальных и аварийных условиях работы данных устройств, с использованием имитационных пакетов, в частности, Matlab Simulink и SciLab Xcos.

Внедряемая методика является результатом диссертационной работы Снитько И.С. Научная и практическая значимость результатов работы состоит в разработке динамической модели силового трансформатора, которая строится на расчетах магнитного поля с использованием библиотеки конечно-элементного моделирования EMLib. Результаты расчетов используются в качестве параметров динамической модели устройства, передаваемых в управляемые источники тока электрической схемы замещения трансформатора.

Данная методика позволяет учесть влияние на динамические характеристики моделируемого устройства всех особенностей его конструкции и, соответственно, топологии полей рассеяния. По быстродействию разработанная модель сопоставима с цепными моделями, что позволяет использовать ее в качестве подсистемы уточненных поверочных расчетов в САПР силовых трансформаторов, реализуемых с помощью современных имитационных пакетов. Это дает возможность на стадии проектирования исследовать моделируемое устройство в различных режимах работы в режиме имитации эксперимента в реальном времени.

Начальник отдела «Электрические машины  
и силовые трансформаторы»  
научно-исследовательского центра  
ООО «НПК «АВТОПРИБОР»

М.И. Никифоров



"УТВЕРЖДАЮ"

Проректор по учебной работе  
ФГБОУ ВО "Ивановский государственный  
энергетический университет имени В.И. Ленина"

А.В. Гусенков

"17" сентября 2022 г.

## АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационной работы Снитко И.С.

На кафедре «Теоретические основы электротехники и электротехнологии» (ТОЭЭ) старший преподаватель Снитко И.С. проводит научно-исследовательскую работу по разработке подсистемы уточненных поверочных расчетов САПР силовых трансформаторов, позволяющей уже на стадии проектирования производить анализ установившихся и переходных режимов с учетом возможной несимметрии в нормальных и аварийных условиях работы силового трансформатора с учетом взаимного влияния полей вне магнитной системы и его нелинейных характеристик.

Содержащиеся в диссертационной работе результаты научно-технической деятельности Снитко И.С., заключающиеся в разработке математической модели расчета установившихся симметричных, несимметричных и аварийных режимов работы, используются при подготовке обучающихся по направлению 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника, профиль «Электротехника и электротехнологии». На основе предлагаемых математических моделей разработаны практические занятия по разделу «Матричные методы расчета стационарных режимов нелинейных электрических и магнитных цепей» дисциплины «Матричные методы анализа электрических и магнитных цепей».

В соответствии с тематикой исследований разработано учебное пособие «Анализ электрических и магнитных цепей с использованием матриц», в котором используется предложенная Снитко И.С. методика анализа участков электрических сетей, содержащих силовые трансформаторы, позволяющая определять диапазоны значений токов в обмотках с учетом взаимного влияния полей вне магнитной системы и нелинейных характеристик силовых трансформаторов.

Декан электроэнергетического  
факультета, к.т.н., доцент

 А.Ю. Мурзин

Заведующий кафедрой ТОЭЭ,  
к.т.н., доцент

 М.Е. Тихов



Утверждаю

Генеральный директор  
ООО «Трансформер»

/ Решетников И. В./

2022 г.

## АКТ

## внедрения методики расширенного поверочного расчета

В практику научных исследований и проектирования силовых трансформаторов на ООО «Трансформер» внедряется методика расширенного поверочного расчета силовых трансформаторов, основанная на использовании имитационных моделей установившихся и переходных режимов работы силовых трансформаторов и позволяющая на этапе проектирования реализовать численное исследование данных установившихся и переходных режимов работы в нормальных и аварийных условиях работы данных устройств с учетом возможной несимметрии, с применением имитационных пакетов, в частности, Matlab Simulink и SciLab Xcos.

Внедряемая методика является результатом диссертационной работы Снитько И.С. Научная и практическая значимость результатов работы состоит в разработке методики расширенного поверочного расчета, которая строится на расчетах магнитного поля за пределами магнитопровода трансформатора с использованием библиотеки конечно-элементного моделирования EMLib. Результаты расчетов используются в качестве параметров модели переходных, установившихся и аварийных режимов устройства, передаваемых в управляемые источники тока электрической схемы замещения трансформатора. Научная новизна работы состоит в использовании оригинального подхода, позволяющего учитывать взаимное влияние магнитных полей обмоток за пределами магнитопровода. При этом появляется возможность учесть особенности переходных режимов трансформатора, которые ранее в подобных моделях не учитывались.

Данная методика позволяет на этапе проектирования устройства оценить возможность его работы в режиме имитации эксперимента в реальном времени и учесть влияние на динамические характеристики моделируемого устройства всех особенностей его конструкции и, соответственно, топологии полей вне магнитопровода.

Данная методика интегрирована в подсистему расширенного поверочного расчета САПР силовых трансформаторов TransCAE, используемую в практике проектирования ООО «Трансформер».

Начальник службы ТК и СО  
ООО «Трансформер», к.т.н.

/ Печенкин В.И. /

Старший преподаватель  
каф. ТОЭЭ ИГЭУ

/ Снитько И.С. /

П8. Свидетельство на программный продукт



МИНОБРНАУКИ РОССИИ

федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение  
высшего образования

«Ивановский государственный  
энергетический университет  
имени В.И. Ленина»  
(ИГЭУ)

ул. Рабфаковская, 34, г. Иваново, 153003  
тел. (4932) 32-72-43, факс (4932) 38-57-01  
e-mail: office@ispu.ru <http://игэу.рф> <http://ispu.ru>  
ОКПО 02068195; ОГРН 1033700074430  
ИНН/КПП 3731000308/370201001

Наш № 16-04-02/06-22 от \_\_\_\_\_  
На \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

Г регистрация программы для ЭВМ Г

РОСПАТЕНТ

Федеральное государственное учреждение  
«Федеральный институт промышленной  
собственности Федеральной службы по  
интеллектуальной собственности, патентам и  
товарным знакам (ФГУ ФИПС)  
Отдел регистрации программ для ЭВМ,  
баз данных и топологий ИМС и передачи прав на них

Бережковская наб. 30, корп. 1  
Москва Г-59, ГСП-3, 125993

Направляем Вам на регистрацию программу для ЭВМ «Система расчета установившихся симметричных и несимметричных режимов работы силовых трансформаторов с учетом комплексной магнитной проницаемости», правообладателем исключительного права на которую (заявителем) является федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» (ИГЭУ) с выдачей одного свидетельства.

Комплектность заявки указана в приложении.

Приложение:

1. Заявление	на	1	л.	в	1	ЭКЗ.
2. Дополнение к заявлению	на	1	л.	в	1	ЭКЗ.
3. Машиночитаемый носитель				в	1	ЭКЗ.
4. Реферат	на	1	л.	в	2	ЭКЗ.
5. Платежный документ об уплате госпошлины	на	1	л.	в	1	ЭКЗ.
6. Приложение №3. Согласие на обработку персональных данных	на	2	л.	в	1	ЭКЗ.
7. Приложение №4. Согласие на указание сведений об авторе в заявлении на государственную регистрацию программы для ЭВМ или базы данных	на	2	л.	в	1	ЭКЗ.

Всего на 8 листах + 1 платежный документ + 1 машиночитаемый носитель.  
Свидетельство прошу выслать по почте  
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская 34,  
ИГЭУ, патентно-лицензионный отдел

Проректор по научной работе ИГЭУ



/В.В. Тютиков  
02 2022 г.