

MODELING OF TRANSIENT PROCESSES IN POWER TRANSFORMERS AND CURRENT TRANSFORMERS**Kazanina I.***к.т.н., доцент кафедры «Электроснабжение и возобновляемые источники энергии»
Алматинский университет энергетики и связи (г.Алматы, Казахстан)***Dokdyrkhan A.***магистрант кафедры «Электроснабжение и возобновляемые источники энергии»
Алматинский университет энергетики и связи (г.Алматы, Казахстан)***МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ И ТРАНСФОРМАТОРАХ ТОКА****Казанина И.В.***к.т.н., доцент кафедры «Электроснабжение и возобновляемые источники энергии»
Алматинский университет энергетики и связи (г.Алматы, Казахстан)***Докдырхан А.К.***магистрант кафедры «Электроснабжение и возобновляемые источники энергии»
Алматинский университет энергетики и связи (г.Алматы, Казахстан)*<https://doi.org/10.5281/zenodo.14499288>**Abstract**

Mathematical modeling of transient processes is essential for enhancing relay protection in power and current transformers. MATLAB facilitates accurate analysis by accounting for nonlinear materials and phase-switching delays, ensuring reliability and safety.

Аннотация

Эффективность работы релейной защиты силовых трансформаторов (СТ) и трансформаторов тока (ТТ) во многом зависит от достоверного анализа переходных процессов (ПП) в их токовых цепях. Проведение натурных экспериментов для исследования ПП часто невозможно из-за риска повреждения оборудования, значительных затрат и влияния на устойчивость энергосистемы. В статье описаны подходы к математическому моделированию ПП, основные сложности, связанные с этим процессом, и преимущества использования программных пакетов, таких как MATLAB, для построения и анализа моделей трансформаторов.

Современные электроэнергетические системы сталкиваются с задачами повышения надёжности и устойчивости работы оборудования. Силовые трансформаторы играют ключевую роль в передаче и распределении энергии, а их отказ может привести к серьёзным авариям. Анализ переходных процессов (ПП), возникающих в цепях трансформаторов, важен для выявления наиболее критических режимов и обеспечения эффективной работы релейной защиты (РЗ).

Традиционные методы исследования, такие как натурные эксперименты, имеют ряд ограничений:

- Высокая стоимость и сложность организации.
- Риск повреждения оборудования.
- Ограниченные возможности для анализа редких и экстремальных ПП.

Поэтому основным инструментом для изучения ПП становится математическое моделирование. Оно позволяет заменить реальный объект его абстрактной моделью, проводить численные эксперименты и исследовать различные режимы работы оборудования.

Подходы к моделированию переходных процессов

Переходные процессы в СТ и ТТ происходят в условиях сложного взаимодействия электрических

и магнитных цепей. Условия, определяющие ПП, включают:

- Остаточную индукцию в сердечниках трансформаторов.
- Различие характеристик намагничивания фазных обмоток.
- Нелинейные свойства материалов магнитопровода.
- Разновременность включения фаз выключателя.

Эти факторы носят вероятностный характер, что затрудняет их учёт при аналитических исследованиях. В связи с этим требуется разработка математических моделей, позволяющих проводить численные эксперименты и анализировать поведение трансформаторов в экстремальных режимах.

Для построения моделей используется пакет MATLAB, обеспечивающий интеграцию дифференциальных уравнений с высокой точностью.

Модель броска тока намагничивания однофазного трансформатора

Задача расчёта переходных режимов трансформатора заключается в определении временных зависимостей токов и магнитных потоков на основе параметров оборудования и начальных условий.

Принципиальная схема трансформатора

Принципиальная схема однофазного трансформатора, работающего на холостом ходу, представлена на рисунке 1.

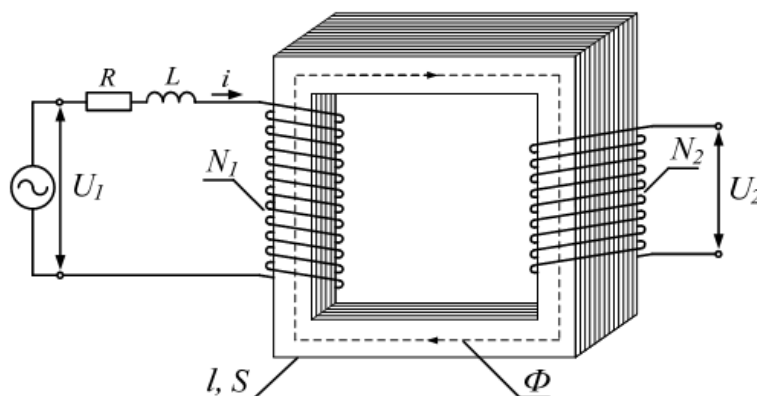


Рисунок 1 – Принципиальная схема однофазного трансформатора на холостом ходу (вторичная обмотка разомкнута).

Математическая модель

Модель базируется на законах Кирхгофа и зависимости потокоцепления от магнитной индукции. Основные уравнения:

Уравнение напряжения:

$$U_1 = R \cdot i + \frac{d\Psi}{dt},$$

$$\text{где } \Psi = N_1 \cdot B \cdot S.$$

Уравнение связи индукции и напряжённости:

$$H = \frac{N_1 \cdot i}{l}.$$

Дифференциальная индуктивность:

$$L_d = \frac{d\Psi}{di} = N_1 \cdot S \cdot \frac{dB}{dH}.$$

Уравнения приведены к форме Коши для численного интегрирования.

Упрощения модели

- Пренебрежение активными потерями в стали сердечника.
- Использование основной кривой намагничивания вместо петли гистерезиса.
- Пренебрежение ёмкостными токами.

Решение уравнений в MATLAB

Для решения системы уравнений использовался метод Рунге-Кутты. В качестве входных данных использована характеристика намагничивания стали Э330А, представленная в таблице 1.

Магнитная индукция B , Тл	0,0	0,4	0,8	1,4	1,5	1,6	1,7
Напряжённость магнитного поля H , А/м	0	28	46	100	130	200	800
Магнитная индукция B , Тл	1,85		1,9		1,95		2,0
Напряжённость магнитного поля H , А/м	2500		5000		10000		30000

Результаты моделирования

Расчёт броска тока намагничивания показал:

- При включении трансформатора на холостой ход наблюдается значительный скачок тока намагничивания, зависящий от остаточной индукции.

- Глубокое насыщение магнитопровода приводит к уменьшению дифференциальной индуктивности и увеличению тока.

Графики изменения магнитной индукции и токов, полученные в MATLAB, подтверждают адекватность модели (рис.2).

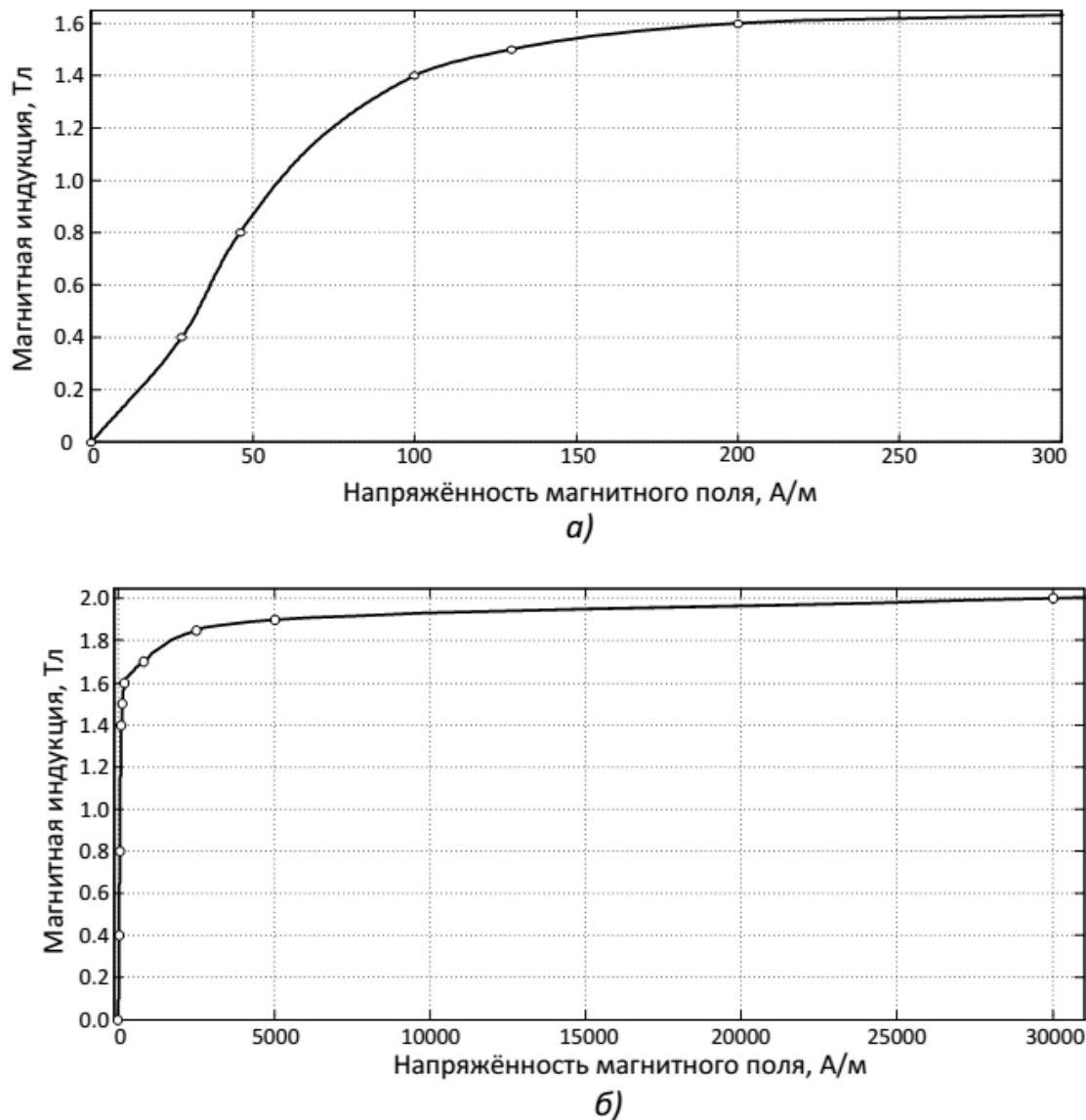


Рисунок 2 – Основная кривая намагничивания стали Э330А, полученная в результате интерполяции: а) на интервале изменения напряжённости магнитного поля от 0 до 300 А/м; б) на интервале изменения напряжённости магнитного поля от 0 до 30000 А/м

Роль математических моделей

Математическая модель — это совокупность математических уравнений, описывающих поведение реального объекта. Для исследования ПП в СТ модель должна адекватно учитывать следующие параметры:

- Электрические свойства цепей (сопротивление, индуктивность, ёмкость).
- Нелинейные характеристики намагничивания сердечников.
- Гистерезисные свойства материалов (в определённых режимах).

В современных программных пакетах для моделирования электроэнергетических систем, таких как MATLAB, Simulink и другие, реализованы базовые модели СТ. Эти модели позволяют учитывать:

- Нелинейность характеристики намагничивания.
- Влияние гистерезиса.

- Геометрические и электрические параметры трансформаторов.

Однако стандартные библиотеки программных продуктов ориентированы на массовые конструкции трансформаторов. Модели мощных автотрансформаторов со сложными магнитными и электрическими цепями требуют доработки или создания пользовательских решений.

Использование MATLAB для моделирования ПП

MATLAB является одним из наиболее универсальных инструментов для численного моделирования. В нём реализованы мощные алгоритмы интегрирования дифференциальных уравнений и инструменты для интерполяции нелинейных характеристик.

Применение MATLAB для моделирования ПП в СТ позволяет:

Учитывать реальную кривую намагничивания материалов сердечников.

Исследовать влияние остаточной индукции на токовые цепи.

Изучать поведение трансформаторов в различных режимах, включая глубокое насыщение.

Для построения моделей используются экспериментальные данные о свойствах электротехнических сталей. Интерполяция характеристик намагничивания выполняется с помощью кубических сплайнов или других методов, что позволяет точно воспроизводить изменения индукции при заданных значениях напряжённости магнитного поля.

Проблемы и ограничения стандартных моделей

Стандартные модели в инженерных программных пакетах имеют ограничения:

- Упрощённое описание нелинейных свойств сердечников.
- Отсутствие моделей для сложных конфигураций трансформаторов (например, с несколькими магнитопроводами).
- Ограниченная возможность учёта специфических режимов работы, таких как асимметрия токов или фаз.

Эти ограничения делают актуальной задачу создания пользовательских моделей, которые учитывают уникальные характеристики исследуемых трансформаторов.

Заключение

Моделирование переходных процессов в силовых трансформаторах и трансформаторах тока является важным инструментом для анализа и повышения устойчивости энергосистем. Применение численных методов, реализованных в MATLAB, позволяет точно воспроизводить поведение трансформаторов в различных режимах, учитывать нелинейные свойства материалов и исследовать влияние остаточной индукции.

Создание пользовательских моделей для сложных конструкций трансформаторов открывает новые возможности для анализа редких и экстремальных переходных процессов. Это способствует улучшению релейной защиты и предотвращению аварийных ситуаций.

Список литературы:

1. Ерушин, В. П. Повышение устойчивости функционирования дифференциальных защит силовых трансформаторов : дис. ...канд. техн. наук : 05.14.02 / В. П. Ерушин. – Новосибирск, 1981. – 217 с.
2. Засыпкин А. С. Релейная защита трансформаторов / А. С. Засыпкин. – Москва : Энергоатомиздат, 1989. – 240 с.
3. Федосеев, А. М. релейная защита электрических систем : учеб. для вузов / А. М. Федосеев. – Москва : Энергия, 1976. – 560 с.