

На правах рукописи



**ЧАБАНОВ Евгений Александрович**

**НОВЫЙ ПОДХОД К ИССЛЕДОВАНИЮ И ИДЕНТИФИКАЦИИ  
ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ МОЩНЫХ СИНХРОННЫХ МАШИН  
ПО РЕЗУЛЬТАТАМ СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЙ**

05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2015

Работа выполнена на кафедре «Электротехника и электромеханика»  
ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Шулаков Николай Васильевич**

Официальные оппоненты: **Беспалов Виктор Яковлевич**,  
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО  
«Национальный исследовательский университет  
”МЭИ“», профессор кафедры «Электромеханика»;

**Родионов Игорь Евгеньевич**,  
кандидат технических наук, доцент,  
ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,  
доцент кафедры «Электрические машины»

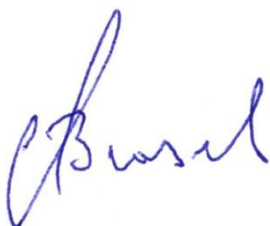
Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный  
университет» (национальный исследовательский  
университет), г. Челябинск.

Защита диссертации состоится «17» февраля 2016 г. в 14 ч. 00 мин. на  
заседании диссертационного совета Д 212.285.03 на базе ФГАОУ ВПО  
«Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.  
Ельцина» по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19, ауд. И-420 (зал  
Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ  
ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России  
Б.Н. Ельцина»: <https://dissovet.science.urfu.ru/news2/>

Автореферат диссертации разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Зюзев Анатолий Михайлович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Основные причины, затрудняющие обработку первичной информации с использованием электронно-вычислительных машин и электронных средств регистрации результатов стендовых испытаний на предприятиях электромашиностроительной отрасли, исследования и идентификацию переходных процессов (ПП) мощных синхронных машин (МСМ) по отечественным и международным стандартам следующие:

- разнообразие ПП в обмотках синхронных машин (СМ), форм сигналов для унификации обработки первичной информации и методов исследования и идентификации ПП с учетом влияния на них различных случайных факторов;
- проблемы с обоснованием границ для исследования и идентификации длительных составляющих ПП;
- отсутствие эффективных способов исследования, идентификации и погрешностного анализа ПП в условиях влияния различных случайных факторов;
- существенная трудоёмкость, низкая точность обработки, обилие графо-аналитических операций, разброс конечных результатов, неспособность методов отечественных и международных стандартов к оптимизационным процедурам.

В настоящей работе основное внимание уделено обоснованию нового подхода к исследованию и идентификации ПП СМ более 100 кВА и разработке вероятностно-статистических методов (ВСМ) на базе использования элементов теории вероятностей и математической статистики с целью идентификации ПП с высокой точностью и достоверностью результатов стендовых данных по отечественным и международным стандартам. При этом важными моментами являются съём, сжатие и обработка первичной информации особенно в виде его синусоидально затухающих (возрастающих) ПП связанных с выделением вершин, т.к. точность и адекватность идентификации различных ПП СМ во многом зависят от аппаратного способа получения первичной информации при стендовых испытаниях в процессе их изготовления, модернизации, эксплуатации и ремонта.

**Степень разработанности темы исследования.** Методы исследования и идентификации зашумленных ПП по результатам стендовых испытаний натуральных образцов СМ, разработанные в диссертации на высоком и достоверном уровне с использованием элементов теории вероятностей и математической статистики, доведены до уровня практического использования при проведении промышленных испытаний серийных изделий на заводах-изготовителях.

**Объект исследования.** Неявнополюсные СМ мощностью более 100 кВА, используемые в системах производства, передачи и распределения электроэнергии.

**Предмет исследования.** Электромагнитные ПП, протекающие в обмотках СМ, для их исследования и идентификации в объемах программы приемочных стендовых испытаний на заводах-изготовителях.

**Целью работы** является обоснование нового подхода к высокоточным и достоверным исследованиям с идентификацией ПП МСМ для разработки теоретических основ ВСМ на базе теории вероятностей и математической статистики с целью обработки результатов стендовых испытаний в условиях влияния различных случайных факторов.

**Задачи**, решаемые при достижении поставленной цели:

1. Анализ недостатков методов в существующих стандартах по программе приемочных испытаний МСМ для обоснования нового подхода к исследованию и идентификации их ПП по результатам стендовых испытаний в условиях влияния различных случайных факторов.

2. Разработка теоретических основ нового подхода к исследованию и идентификации ПП СМ по результатам стендовых испытаний с учетом влияния различных случайных факторов, завершившийся разработкой ВСМ на базе элементов теории вероятностей и математической статистики.

3. Апробация нового подхода к исследованию и идентификации ПП МСМ с

использованием ВСМ с элементами теории вероятностей и математической статистики по результатам их стендовых испытаний с использованием цифрового запоминающего осциллографа (ЦЗО) в опытах внезапного симметричного короткого замыкания (ВКЗ), гашения поля (ГП), восстановления напряжения (ВН), ударного возбуждения (УВ) с учетом влияния различных случайных факторов.

4. Погрешностный анализ апробации нового подхода к исследованию и идентификации ПП СМ по результатам стендовых испытаний с учетом влияния различных случайных факторов.

5. Обзор выявленных возможностей ВСМ.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в следующем:

1. Разработан новый подход к исследованиям и идентификации ПП СМ в объеме опытов, регламентированных программой приемочных испытаний по отечественным и международным стандартам, позволяющий в условиях влияния различных случайных факторов идентифицировать ПП МСМ в опытах ВКЗ, ВН, ГП, УВ с высокой точностью и достоверностью.

2. На базе элементов теории вероятностей и математической статистики впервые разработан исчерпывающий метод статистических исследований с качественным анализом влияния опытных данных ПП СМ в исследуемом диапазоне ПП на свойства случайного признака: с целью формирования и определения свойств генеральной совокупности (ГС) случайного признака и выборки из нее; для оценки уровня зашумленности и отклонения случайного признака от экспоненциального затухания переходной составляющей симметричного тока якоря по сформированным на опытных данных вариационным рядам ГС и выборки из нее; для подтверждения гипотезы предполагаемого нормального закона распределения случайного признака относительно математического ожидания (МО) по сформированным на опытных данных вариационным рядам ГС и выборки из нее с использованием критерия согласия Пирсона; для минимизации объема эффективных точечных выборок (ЭТВ) с использованием распределения Пуассона для редких случайных событий; для разработки нового способа близости свойств вариационных рядов ГС и выборки из нее с использованием минимизированного объема ЭТВ вместо классического метода интервальных оценок; для модернизации унифицированных комбинаторных формул с целью исследования и идентификации переходной составляющей симметричного тока якоря СМ с использованием минимизированного объема ЭТВ.

3. Разработан оригинальный метод минимизации среднеквадратичной погрешности приближения модели переходной составляющей в исследуемом диапазоне ПП к ее опытным данным с учётом влияния различных случайных факторов и представление этой погрешности дискретной поверхностью в трехмерной системе координат, что эффективно повышает точность и достоверность результатов идентификации ПП МСМ.

4. Разработан метод эффективной и точной оценки ударного тока из опыта ВКЗ по одной вершине ПП без определения параметров СМ из данного опыта, существенно снижающий трудоемкость обработки ПП СМ.

5. Разработан метод определения индуктивных сопротивлений по оси  $q$  и их отклонения относительно индуктивных сопротивлений по оси  $d$  по результатам стендовых испытаний в опыте ВКЗ.

**Теоретическая значимость работы.** На базе элементов теории вероятностей и математической статистики разработан оригинальный исследовательский ВСМ для высокоточной и достоверной идентификации различных ПП СМ с учетом влияния различных случайных факторов.

**Практическая значимость работы:**

1. Разработан эффективный вариант сжатия используемого объема первичной информации дискретно заданных ПП СМ.

2. Получило дальнейшее развитие аналитического способа выделения вершин,

дискретных огибающих, разделение полного дискретно заданного тока якоря на симметричный и асимметричный токи ПП, что полностью исключает все трудоемкие операции графоаналитического метода (ГАМ) по отечественным и международным стандартам, связанное с подготовкой и обработкой осциллограмм с целью получением электромагнитных постоянных времени и начальных значений составляющих ПП.

3. Вероятностно-статистические методы, разработанные с использованием элементов теории вероятностей и математической статистики исследования и идентификации ПП МСМ по опытным данным стендовых испытаний в условиях влияния различных случайных факторов и разброса электромагнитных параметров МСМ, гарантируют их высокую точность и достоверность.

4. Разработана оценка коррекции погрешности смещения первых 5-6 вершин ПП в опытах ВКЗ.

5. Использование ЦЗО при испытаниях СМ позволило разработать метод идентификации свёрхпереходной составляющей в опытах ГП из единого ПП.

6. Разработанные ВСМ исследования и идентификации ПП МСМ по результатам стендовых испытаний представляют практическую ценность для проектирования, модернизации, эксплуатации и ремонта СМ.

7. Разработаны рабочие алгоритмы и программы для исследования, идентификации и экспресс-обработки ПП МСМ в объёме требований отечественных и международных стандартов на их испытания.

**Методология и методы исследования** определялись поставленными задачами и были основаны на методологии ГАМ, являющегося основным методом идентификации ПП СМ отечественных и международных стандартов, который в настоящее время из-за разброса конечных результатов, неспособности к оптимизационным процедурам не обеспечивает высокой точности и достоверности в условиях влияния различных случайных факторов. Поэтому в диссертации с сохранением методологии ГАМ обоснован новый подход к исследованию и идентификации ПП СМ с использованием элементов теории вероятностей и математической статистики, включающий оригинальные и нестандартные процедуры: преобразование аналоговой первичной информации в дискретную с использованием ЦЗО; способы ее сжатия при выделении вершин; на базе элементов теории вероятностей и математической статистики разработан новый метод статистических исследований с качественным анализом влияния опытных данных ПП СМ в исследуемом диапазоне с переходной составляющей на свойства случайного признака, который позволяет: формировать на основе ранее полученного базового случайного признака по опытным данным ГС случайного признака и выборку из нее; формировать по ГС случайного признака и выборке из нее вариационные ряды с определением их свойств; подтверждать по свойствам вариационных рядов гипотезу предполагаемого нормального закона распределения случайного признака относительно МО с использованием критерия согласия Пирсона; оценивать по свойствам вариационных рядов, их размахам и коэффициентам вариации уровень зашумленности и отклонения случайного признака от экспоненциального затухания переходной составляющей симметричного тока якоря; минимизировать объем ЭТВ с использованием распределения Пуассона для редких случайных событий; оценивать близость свойств вариационных рядов ГС и выборки из нее с использованием базовых свойств минимизированного объема ЭТВ; модернизировать унифицированные комбинаторные выражения для исследования и идентификации переходной составляющей симметричного тока якоря СМ. Для высокоточной идентификации переходной составляющей симметричного тока якоря разработан новый метод минимизации среднеквадратичной погрешности приближения модели этой составляющей к ее опытным данным на длительных участках ПП СМ с одновременной вариацией нижней границы и установившегося значения напряжения (тока) якоря с представлением этой погрешности в виде дискретной поверхности в трехмерном измерении. Критериальная оценка

среднеквадратичной погрешности приближения модели полного ПП к опытным данным в различных ПП осуществлена с использованием метода максимума правдоподобия или наименьших квадратов.

Поставленные задачи решены с использованием разработанного ВСМ, содержащего оригинальные и нестандартные методы, которые апробированы и подтверждены высокой достоверностью результатов идентификации ПП на натуральных образцах СМ, а также минимизированной среднеквадратичной погрешностью приближения с использованием метода максимума правдоподобия или наименьших квадратов.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Анализ недостатков известных методов отечественных и международных стандартов в объеме программы приемочных испытаний и обоснование поиска нового подхода к исследованию и идентификации ПП МСМ по результатам их стендовых испытаний в условиях влияния различных случайных факторов.

2. Разработка теоретических основ нового подхода к исследованию и идентификации ПП СМ в рамках теории вероятностей и математической статистики с возможностями их использования в режиме экспресс-обработки при проектировании, модернизации и защите партий СМ в объеме приемочных испытаний и при их ремонте.

3. Результаты апробации нового подхода к исследованию и идентификации ПП, полученных на натуральных образцах МСМ с использованием ЦЗО, по результатам стендовых испытаний в опытах ВКЗ, ВН, ГП с учетом влияния на них различных случайных факторов. Разработанные рабочие алгоритмы и программы.

4. Погрешностный анализ нового подхода к исследованию и идентификации ПП по результатам апробации натуральных образцов МСМ.

5. Возможности разработанных ВСМ.

#### **Степень достоверности и апробация результатов.**

Достоверность полученных результатов исследований:

1. Апробирован и подтвержден с использованием ЦЗО для получения результатов стендовых испытаний унифицированный аналитический метод точного выделения вершин при синусоидально затухающих (возрастающих) ПП СМ, который полностью исключает многочисленные трудоемкие графоаналитические операции, связанные с неизбежными субъективными погрешностями ГАМ и влиянием различных случайных факторов на ПП.

2. По результатам стендовых испытаний апробированы и подтверждены основные теоретические положения нового подхода к исследованиям и идентификации ПП с использованием ВСМ и инженерных методов получения первичной информации для экспресс-обработки неустановившихся режимов СМ в условиях влияния различных случайных факторов.

Исследования диссертационной работы проводились при поддержке научных программ и были внедрены в учебный процесс:

1. Научный проект № 13-08-96044 «Новая методика исследования, идентификации и экспресс-обработки ПП МСМ на базе теории вероятностей и математической статистики по результатам стендовых испытаний», финансируемый ФГБУ «Российский фонд фундаментальных исследований»

2. Государственное задание Министерства образования и науки Российской Федерации № 13.832.2014/К "Разработка методологических основ адаптивного управления автономными и неавтономными газотурбинными электростанциями мощностью до 25 МВт".

3. Разработанный в рамках диссертационной работы новый подход исследования и идентификации ПП СМ с использованием ВСМ по результатам стендовых испытаний используется в учебном процессе для бакалавров III и IV курсов, магистров I курса обучения направления «Электроэнергетика и электротехника», профиля «Электромеханика», а также использовался в учебном процессе обучения инженеров-электромехаников IV и V курсов.

Апробация работы. Основные результаты работы, изложенные в диссертации,

доклаживались и получили одобрение на научно-технических конференциях: Научно-техническая конференция горно-нефтяного факультета ПГТУ, Пермь: XXXI(2002), XXXIII(2004); Международная научно-практическая конференция «Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы», Екатеринбург: III(2007), IV(2011); III Всероссийская научно-техническая интернет-конференция «Энергетика. Инновационные направления в энергетике. CALS-технологии в энергетике» (Пермь,2010); X Научно-практическая конференция «Инженерные, научные и образовательные приложения на базе технологий National Instruments 2011»(Москва,2011); Международная интернет-конференция молодых ученых, аспирантов, студентов «Инновационные технологии: теория, инструменты, практика», InnoTech, Пермь: II(2010), V(2013); Международная конференция «Электромеханика, Электротехнологии, Электротехнические материалы и Компоненты» МКЭЭЭ, Крым, Алушта: V(2003), VI(2004), XI(2006), XII(2008), XIII(2010), XIV(2012); International Symposium on Theoretical Electrical Engineering, ISTET 2013 (Pilsen, Czech Republic,2013);Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий», АПЭЭТ, Екатеринбург: I(2006), III(2014); XIII Международная научно-практическая конференция «Актуальные вопросы науки» (Москва, 2014).

Результаты апробации нового подхода к исследованию и идентификации ПП СМ по итогам стендовых испытаний на натуральных МСМ мощностью 110 МВт, докладывались и получили одобрение на научно-техническом совете с участием главных специалистов ООО «Электротяжмаш-Привод».

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 36 научных работ, из них в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК, – 9, в других изданиях – 27.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Основной текст содержит 180 страниц, 58 рисунков, 43 таблицы. Список использованной литературы включает 107 наименований.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Введение** содержит: обоснование актуальности и степень разработанности темы исследований; краткое описание объекта и предмета исследований; цель работы; постановку задач исследований; научную новизну; теоретическую и практическую значимость работы; краткое описание методологии и методов исследований, используемых в работе; положения, выносимые на защиту; степень достоверности, апробацию результатов и список научно-технических конференций, на которых результаты работы докладывались и получили одобрение. Приведены сведения о публикациях, структуре, основных вопросах, рассмотренных в главах диссертационной работы.

**Первая глава** посвящена анализу текущего состояния методов обработки данных по результатам стендовых испытаний МСМ по отечественным и международным стандартам, методов исследования и идентификации ПП в условиях влияния различных случайных факторов. Разброс идентифицируемых параметров ПП СМ по отечественным и зарубежным стандартам, значительная трудоемкость, погрешность обработки, невозможность учета влияния на ПП различных случайных факторов, а также сложный математический аппарат некоторых методов и их нетехнологичность явились основными причинами разработки нового подхода к исследованию и идентификации ПП СМ по результатам стендовых испытаний с учетом влияния различных случайных факторов с привлечением элементов теории вероятностей и математической статистики.

Применение элементов теории вероятностей и математической статистики еще в 80-х годах прошлого XX века было предложено на кафедре «Электротехника и электромеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета (ранее «Пермский политехнический институт», затем «Пермский государственный технический университет»), которым занимается до сих пор доцент, канд. техн. наук Судаков Анатолий Иванович, оказавший диссертанту ценную консультационную помощь при выполнении

диссертационной работы.

В диссертации на базе теории вероятностей и математической статистики доказано, что только кардинальная теоретическая разработка ВСМ с поисками новых нетрадиционных методов для высокоточного погрешностного анализа способны обеспечить высокую достоверность и точность идентификации ПП СМ.

**Во второй главе** подробно изложены теоретические основы разработанного нового подхода к исследованию и идентификации синусоидально затухающих (возрастающих) по экспоненциальному закону ПП в обмотках якоря МСМ по результатам стендовых испытаний в опытах ВКЗ, ГП, ВН, УВ, которые являются наиболее трудоемкими и неточными для обработки методами по отечественным и международным стандартам. Новый подход заключается в разработке ВСМ исследования и идентификации ПП МСМ на базе теории вероятностей и математической статистики. Центральным и наиболее информативным по результатам исследования и идентификации в теории ПП СМ является опыт ВКЗ, на основе которого в диссертации наиболее полно рассмотрена разработка ВСМ исследования и идентификации ПП с распространением на остальные опыты.

На первом этапе (Рисунок 1) осуществляется аппаратно-цифровое преобразование первичной аналоговой информации с применением интеллектуального ЦЗО в цифровой код (Рисунки 2,а, 3,а, 4,а); сжатие и сглаживание цифровой информации, выделение вершин ПП с высокой точностью с шагом 0,02 сек (Рисунки 2,б, 3,б, 4,б); представление ПП в виде дискретных элементов между огибающими с шагом 0,01 сек (Рисунки 2,в, 3,в, 4,в); преобразование возрастающего ПП в убывающий в опыте ВН (Рисунок 3,г); представление ПП обобщенной дискретно заданной функцией далее по формуле (2) с целью разделения ПП на симметричный и асимметричный токи. На первом этапе отсутствует необходимость использования элементов теории вероятностей и математической статистики для исследования и идентификации ПП.

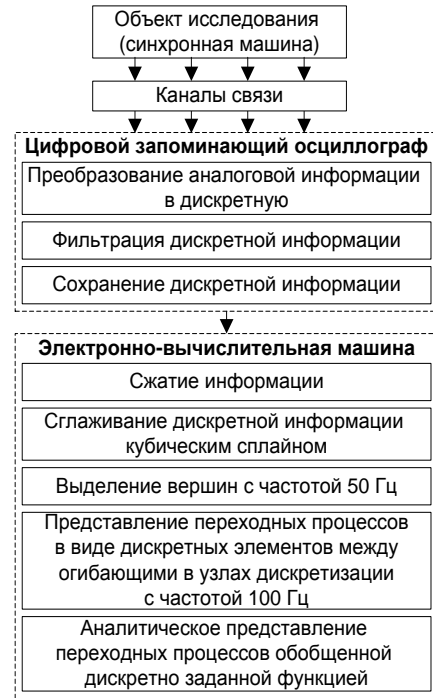


Рисунок 1 – Алгоритм исследования ПП СМ

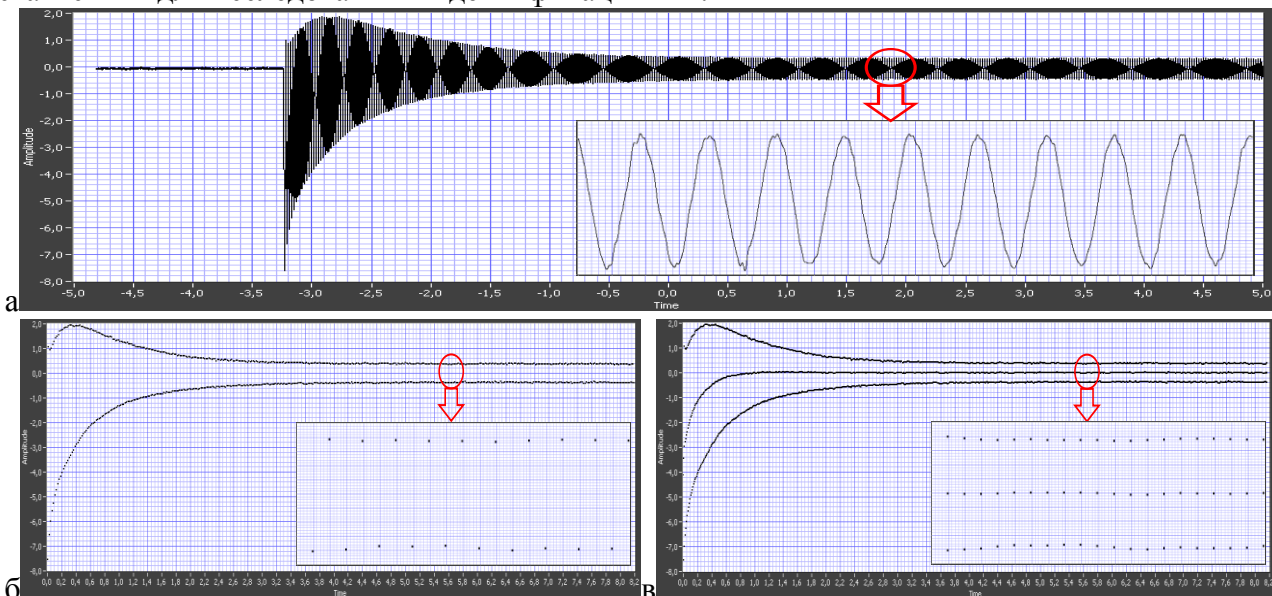


Рисунок 2 – Предварительная обработка первичной информации для одной из фаз СМ в опыте ВКЗ при уровне напряжения испытания  $0,7U_{ном}$



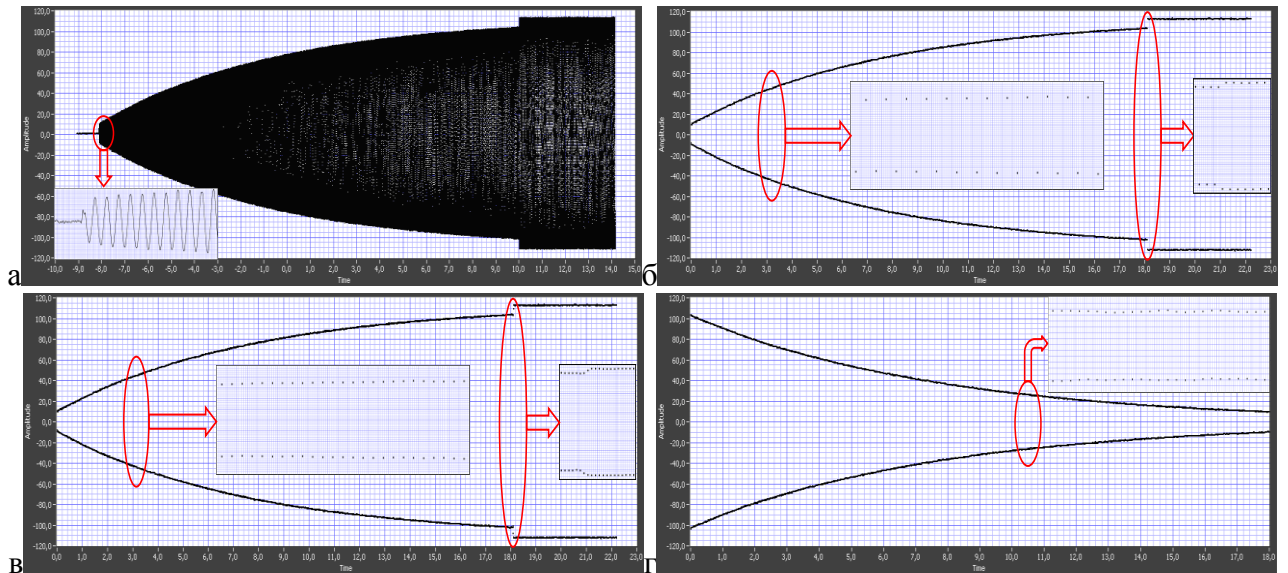


Рисунок 3 – Предварительная обработка первичной информации в опыте ВН

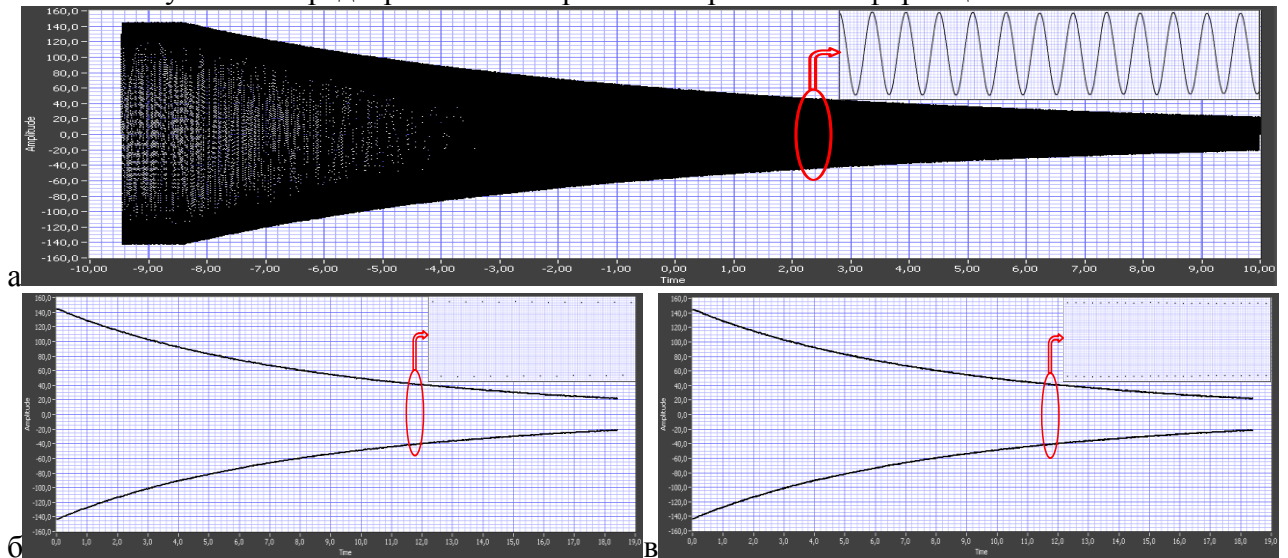


Рисунок 4 – Предварительная обработка первичной информации в опыте ГП

Представление ПП в виде дискретных элементов между огибающими  $i_{oj}$  (Рисунки 2, в, 3, в, 4, в) с шагом  $\Delta t = 0,01$  с осуществлено аналитически:

$$\left. \begin{aligned} i_{oj}(\Delta t) &= i_{ij}(\Delta t) + |I_{Bj}(\Delta t)|, \quad j = 2, \overline{K-3}, \\ i_{ij}(\Delta t) &= |0,375 \cdot I_{B(j-1)}(\Delta t) + 0,75 \cdot I_{B(j+1)}(\Delta t) - 0,125 \cdot I_{B(j+3)}(\Delta t)|, \\ i_{и1}(\Delta T) &= 1,875 \cdot I_{B2}(\Delta t) - 1,25 \cdot I_{B4}(\Delta t) + 0,375 \cdot I_{B6}(\Delta t), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $i_{oj}(\Delta t)$  – элемент между огибающими; 0,375; 0,75; 0,125 и 1,875; 1,25; 0,375 – коэффициенты, выведенные на базе схемы Эйткена для расчёта интерполяционных узлов  $i_{ij}$ .

На этапе проведены исследования по уменьшению избыточной первичной информации с сохранением положения вершин при укрупнении шага дискретизации.

Переходные процессы в рассматриваемых опытах можно представить обобщённой дискретно заданной функцией в узлах дискретизации  $t_k = k \cdot \Delta t + \Delta T$  при  $k = \overline{1, K}$ :

$$\text{по опытным данным} \quad i(t_k) = A_\infty(t_k) \pm \sum_n A_0^{(n)}(t_k) \quad (2)$$

$$\text{и моделью:} \quad i(t_k) = A_\infty(t_k) \pm \sum_n A_0^{(n)} \cdot e^{(-t_k/\tau^{(n)})}, \quad (3)$$

где  $A_\infty(t_k)$  – установившееся значение тока якоря (ВКЗ), напряжение якоря от остаточного

намагничивания (ГП при разомкнутой обмотке якоря), максимальное установившееся значение напряжения якоря (ВН при разомкнутой обмотке якоря), максимальное установившееся значение тока возбуждения (УВ);  $A_0^{(n)}(t_k)$  – составляющие ПП, определяемые из осциллограмм в виде линейно аппроксимируемых зависимостей, экстраполяция которых на начало координат дает их начальные значения  $A_0^{(n)}$  и электромагнитные постоянные времени  $\tau^{(n)}$  (при  $n = 1$  учитывается одна переходная составляющая; при  $n = 2$  – переходная и сверхпереходная составляющие; при  $n = 3$  – переходная, сверхпереходная и апериодическая составляющие);  $\Delta t$  – шаг дискретизации ( $\Delta t = T/2$  для синусоидальных ПП);  $\Delta T$  – начальный временной сдвиг первой вершины в опыте ВКЗ;  $k$  – переменная шага дискретизации функции от начала ПП.

Аналитическое разделение полного тока якоря в опыте ВКЗ  $i_o(t_k) = i_{o.c}(t_k) - i_{a.c}(t_k)$  на симметричный и асимметричный токи осуществляется с использованием дискретных элементов огибающих ПП с шагом 0,01 с (Рисунок 2,в):

$$i_{o.c}(t_k) = |i_{и.к}(t_k)| + |I_{в.к}(t_k)|, k = 1, K-3, \quad (4)$$

симметричный ток по (4) состоит из суммы значений переходной и сверхпереходной составляющих и установившегося значения тока якоря

$$i_{o.c}(t_k) = i''_{o.св}(t_k) + i'_{o.пер}(t_k) + i_{\infty}(t_k), \quad (5)$$

а определение асимметричного тока якоря осуществляется по выражению

$$i_{a.c}(t_k) = i_o(t_k)/2 - |\pm i_{и.к}| \text{ при } |I_{в.к}| > |i_{и.к}|; i_{a.c}(t_k) = i_{и}(t_k) - |i_o/2| \text{ при } |i_{и.к}| > |I_{в.к}|. \quad (6)$$

Представление ПП моделью по (3) в опыте ВКЗ основано на известном в теории ПП СМ уравнении полного тока якоря, а для опытов ВН, ГП, УВ без апериодической составляющей и с учетом их особенностей.

Выражения (1)-(6) полностью исключают все трудоемкие операции методов, связанных с получением электромагнитных параметров по имеющимся стандартам.

На втором этапе разделение симметричного тока якоря на переходную и сверхпереходную составляющие с целью исключения недостатков ГАМ в стандартах и предлагаемых методов (из-за их точности) потребовало разработки ВСМ на базе элементов теории вероятностей и математической статистики.

1. Разделение дискретного симметричного тока якоря СМ на переходную и сверхпереходную составляющие реализовано благодаря разработке новых ВСМ исследования и идентификации симметричных составляющих тока якоря в объеме:

- обоснование границ дискретного ПП для корректного использования опытных данных;
- использование обоснованного базового случайного признака;
- разработка метода статистических исследований с целью определения влияния опытных данных переходной составляющей в обоснованном диапазоне исследования ПП на свойства случайного признака: исследования, связанные с проверкой гипотезы нормального закона распределения случайного признака по его ГС и выборки из нее с помощью критерия согласия Пирсона; оценка уровня зашумленности переходной составляющей и степени отклонения случайного признака от экспоненциального затухания в обоснованных границах ПП с использованием по данным опыта ВКЗ сформированных вариационных рядов; выявление полного объема ЭТВ и его минимизация с использованием распределения Пуассона для редких случайных событий; разработка инженерного способа близости свойств ГС случайного признака, выборки из нее с использованием базового минимизированного объема ЭТВ.

2. Конструирование на базе минимизированного объема ЭТВ комбинаторных унифицированных выражений для исследования и идентификации переходной составляющей симметричного тока СМ.

3. Разработка нового оригинального метода минимизации среднеквадратичной погрешности приближения переходной составляющей к опытным данным с представлением

этой погрешности поверхностью в трехмерной системе координат.

4. Оптимизация установившегося значения тока якоря и нижней границы переходной составляющей в опыте ВКЗ с использованием процедур её моделирования и минимизации среднеквадратичной погрешности приближения полученной модели к ее опытным данным в исследуемом диапазоне  $t'_H - t'_B^*$  ПП с помощью минимизированного объема ЭТВ.

5. Идентификация сверхпереходной составляющей аналогично переходной составляющей симметричного тока ПП СМ.

6. Идентификация асимметричного тока аналогично переходной составляющей симметричного тока ПП СМ.

7. Критериальная оценка точности приближения модели полного тока якоря идентифицированного ПП к его опытным данным и принятие окончательного решения по результатам исследования и идентификации.

Разделение дискретного симметричного тока якоря СМ на его составляющие связано с заданием нижней границы по формуле

$$t'_H \geq (3 \div 5) \tau''_{\text{расч}}, \quad (7)$$

где  $\tau''_{\text{расч}}$  – расчётное или справочно-нормативное значение постоянной времени сверхпереходной составляющей.

После нижней границы  $t'_H$  уравнение симметричного тока якоря (5), вырождается в сумму переходной составляющей и установившегося значения тока якоря:

$$i_c = (I''_{cm} \cdot e^{-t/\tau'_d} + I'_{cm} \cdot e^{-t/\tau'_d} + I_{cm\infty}) \cos(\omega t + \gamma_0) |_{\text{при } t \geq 5\tau''} = (I'_{cm} \cdot e^{-t/\tau'_d} + I_{cm\infty}) \cos(\omega t + \gamma_0). \quad (8)$$

Верхнюю границу  $t'_B^*$  выбирают при превышении огибающей переходной составляющей над установившимся значением тока якоря до нескольких десятков процентов для МСМ.

Согласно теории ПП огибающие синусоидально затухающих (возрастающих) ПП СМ изменяются по экспоненциальному закону, при этом скорость изменения свободных колебаний с периодом  $T_{\text{св}}$  характеризуется декрементом через натуральный логарифм отношения двух соседних амплитуд одного знака. Он является точечной постоянной времени

$$\tau_{kj} = \frac{t'_j - t'_k}{\ln |i'_{ok}/i'_{oj}|} = \frac{t'_B - t'_H}{\ln |i'_{o,H}/i'_{o,B}|}, \quad (9)$$

где  $k = \overline{1, K}$ ,  $j = \overline{k+1, K}$  – переменные для задания нижней и верхней границ;  $K$  – элементы  $i'_{ok}(\Delta t_k) = i_{ok}(\Delta t_k) - 2I_{\infty} = 2I'_0 \cdot e^{-t_k/\tau'_{kj}}$ , т.е. дискретные величины между огибающими тока якоря на участке ПП с переходной составляющей,  $K = (t'_H - t'_B^*)/\Delta t + 1$ ,  $\Delta t$  – шаг дискретизации, с.

Постоянная времени  $\tau_{kj}$  по выражению (9) принята за базовый случайный признак и, являясь точечной выборкой объёмом  $n = 2$ , легко извлекается из  $K$  элементов в диапазоне  $t'_H - t'_B^*$  на участке ПП с переходной составляющей и позволяет создавать с избыточностью ГС случайного признака. Исследованиями установлено влияние на величину случайного признака измерительного шума, с увеличением которого разброс отклонений  $\tau_{kj}$  возрастает.

Для углублённых исследований по качественному изменению базового случайного признака  $\tau_{kj}$  (9) в диапазоне  $t'_H - t'_B^*$  ПП с переходной составляющей формируется ГС объёмом  $N$  из  $K$  элементов  $i'_{oj}$  выборками  $n = 2$  по формулам

$$N_K^n = K!/(n!(K-n)!), \quad (10)$$

$$N = \sum_{k=1, j=k+1}^K \tau'_{kj} + \sum_{k=2, j=k+1}^K \tau'_{kj} + \dots + \sum_{k=K-1, j=k+1}^K \tau'_{kj}. \quad (11)$$

Вычисляют МО  $\tilde{\tau}'_0$  и дисперсию  $\sigma_0^2$  распределения случайного признака ГС

$$\tilde{\tau}'_0 = \frac{1}{N} \sum_1^N \tau'_{kj}, \quad \sigma_0^2 = \frac{1}{N} \sum_1^N (\tau'_{kj} - \tilde{\tau}'_0)^2. \quad (12)$$

При огромных объемах ГС случайного признака пользуются выборками  $n_B$  из нее, объем которой формируется из условия охвата всех элементов на участке  $t'_H - t'_B$  и создается тем же комбинаторным подходом, что и ГС, с возможностью регулирования объема в любую сторону

$$n_B = \sum_{k=1, j=k+1}^K \tau'_{kj} + \sum_{k=2, j=k+1}^K \tau'_{kj} + \sum_{k=3, j=k+1}^K \tau'_{kj} + \dots \quad (13)$$

Вычисляют МО  $\tilde{\tau}'$  и дисперсию  $\sigma^2$  распределения выборки случайного признака  $n_B$

$$\tilde{\tau}' = \frac{1}{n_B} \sum_1^{n_B} \tau'_{kj}, \quad \sigma^2 = \frac{1}{n_B} \sum_1^{n_B} (\tau'_{kj} - \tilde{\tau}')^2. \quad (14)$$

В случае расхождения параметров сравниваемых совокупностей случайного признака для проверки близости параметров ГС и выборки из нее по результатам (12), (14) предложен инженерный метод сближения получаемых параметров. Проводится ранжирование случайного признака в ГС и выборки из нее с последовательной отбраковкой нереальных больших и малых величин с перерасчетом МО и дисперсии до видимой сходимости по формулам (12), (14). Для принятия окончательного решения в диссертации разработан метод минимизации базового объема ЭТВ.

Важнейшей процедурой для продолжения исследований является подтверждение гипотезы нормального распределения случайного признака по выборке  $n_B$  с использованием критерия согласия Пирсона ( $\chi^2$ ).

При исследованиях и построениях гистограмм для подтверждения предполагаемого нормального закона распределения случайного признака в вариационных рядах были обнаружены отдельные  $\tau_{kj}$ -ые постоянные времени с минимальной относительной погрешностью отклонения их от МО, для которых ранее получена между нижним и верхним элементами в формуле (9) важная жёсткая связь в виде постоянного коэффициента

$$i'_{o.v} = 0,33 \cdot i'_{o.n}. \quad (15)$$

За минимальную погрешность отклонения от МО ее назвали **эффективной точечной выборкой** ( $\tau_{kj}$ )<sub>эф</sub>:

$$(\tau_{kj})_{эф} = \frac{t_{j.эф} - t_{k.эф}}{\ln |i_{ok.эф} / i_{oj.эф}|} = \frac{t_{v.эф} - t_{n.эф}}{\ln |i_{o.n.эф} / i_{o.v.эф}|}. \quad (16)$$

Несмотря на ограниченное количество ЭТВ в ГС базового случайного признака или выборке из него минимизация объема ЭТВ осуществлена с использованием распределения Пуассона для редких случайных событий, согласно которого объем составляет не более 4-х ЭТВ. Подробное обоснование представлено в диссертационной работе. В итоге объём ЭТВ, сконструированный на базе четырёх выборок по (16) с условием (15), обеспечивает высокую надёжность и достоверность параметров идентификации переходной составляющей по опытным данным в процессе обработки результатов стендовых испытаний СМ при  $j = \overline{1,4}$ :

$$n_{эф} = 4, \quad \tilde{\tau}'_{эф} = \frac{1}{4} \sum_{k_{эф}=1, j_{эф}}^4 \tau'_{k_{эф}j_{эф}}, \quad \text{МО} = \tilde{\tau}'_{эф} = \frac{1}{4} \sum_{k_{эф}=1, j_{эф}}^4 \tau'_{k_{эф}j_{эф}}, \quad \sigma_{эф}^2 = \frac{1}{4} \sum_{k_{эф}=1, j_{эф}}^4 (\tau'_{k_{эф}j_{эф}} - \tilde{\tau}'_{эф})^2. \quad (17)$$

Свойства минимизированного объёма ЭТВ стали основой предложенного инженерного метода проверки близости свойств ГС случайного признака и выборки из нее при непрерывном сравнении их свойств с базовыми свойствами минимизированного объёма ЭТВ. Свойства минимизированного объёма ЭТВ являются ключевыми при исследованиях степени отклонения затухания переходной составляющей от экспоненциального закона.

Исследования степени отклонения затухания переходной составляющей от экспоненциального закона связаны: с упорядочиванием совокупности случайного признака

генерального ряда и выборки из него представленных методом ранжированных вариационных рядов по возрастанию или убыванию случайного признака; с расчётом коэффициентов вариации случайного признака, оценки размахов вариационных рядов и сближением уровней МО вариационных рядов по (12), (14) с МО и дисперсией по (17) для оценки степени отклонения от экспоненциальности составляющих симметричного тока якоря. Размах и коэффициент вариации вариационных рядов определяют по формулам

$$R = (\tau'_{kj})_{\max} - (\tau'_{kj})_{\min}, \quad v = (\sigma_b / \tilde{\tau}'_b) \cdot 100\%. \quad (18)$$

Анализ результатов исследования дает окончательное представление об оценках уровней зашумленности реального ПП по отклонению МО  $\tilde{\tau}'_b$  вариационных рядов, а степень отклонения реального ПП от экспоненциального оценивают коэффициентом вариации по (18).

Разработка нового оригинального метода минимизации среднеквадратичной погрешности приближения основана на конструировании комбинаторных унифицированных формул для идентификации переходной составляющей с использованием минимизированного объема ЭТВ в исследуемом диапазоне  $t'_n - t'^*_b$  ПП с учетом условия (15) при  $j = \overline{1,4}$ :

$$n_{\text{эф}} = 4, \quad \tilde{\tau}'_{\text{эф}} = \frac{1}{4} \sum_{k_{\text{эф}}=1, j_{\text{эф}}}^4 \tau'_{k_{\text{эф}}, j_{\text{эф}}}, \quad 2\tilde{I}'_{0\text{эф}} = \frac{1}{4} \sum_{k_{\text{эф}}=1}^4 i'_{o, k_{\text{эф}}} \cdot e^{t_{k_{\text{эф}}}/\tau'_{k_{\text{эф}}}}, \quad \tau'_{k_{\text{эф}}, j_{\text{эф}}} = \frac{j'_{b, \text{эф}} - k'_{n, \text{эф}}}{\ln|i'_{o, n, \text{эф}}/i'_{o, b, \text{эф}}|}, \quad (19)$$

где  $i'_{o, b, \text{эф}} = 0,33i'_{o, n, \text{эф}}$ ,  $k_{\text{эф}} = \overline{1,4}$ ,  $i'_{o, n, \text{эф}} = i_{o, n} - i_{\infty}$ ,  $i'_{o, b, \text{эф}} = i_{o, b} - i_{\infty}$ .

До сих пор в практике испытаний СМ не решена проблема с уровнем установившегося значения тока якоря из опытных данных ПП в опытах ВКЗ. Предложено принимать величину установившегося значения тока якоря в опытах ВКЗ, полученную при осциллографировании ПП любым способом, за исходную с последующей ее оптимизацией. В диссертации на базе теории вероятностей и математической статистики разработан новый оригинальный метод минимизации среднеквадратичной погрешности приближения модели переходной составляющей к опытным данным участка ПП с этой составляющей и представления полученной погрешности в виде дискретной поверхности в трёхмерном измерении. Это достигнуто использованием минимизированного объема ЭТВ (19), свойство которого отклоняться с минимально возможной относительной погрешностью от МО любого созданного объема совокупности случайного признака позволяет легко его извлекать.

Минимизация среднеквадратичной погрешности приближения  $\bar{\Delta}'$  в диапазоне  $t'_n - t'^*_b$  исследования переходной составляющей реализована одновременным варьированием установившегося значения тока якоря и нижней границы  $t'_{n, \text{эф}}$  в дискретно заданной

статистической функции: 
$$[\bar{\Delta}'_K]_{\min} = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_1^K [(i_{ok})_{\text{мод}} - (i_{ok})_{\text{оп}}]^2}, \quad (20)$$

где  $(i_{ok})_{\text{мод}} = 2\tilde{I}'_{0\text{эф}} \cdot e^{-(t'_{n, \text{эф}})_{\text{вар}}/\tilde{\tau}'_{\text{эф}}} + (2I_{\infty})_{\text{вар}} -$  математическая модель дискретно заданного элемента переходной составляющей, получаемая одновременной вариацией установившегося значения тока якоря  $(2I_{\infty})_{\text{вар}}$  и нижней границей  $(t'_{n, \text{эф}})_{\text{вар}}$ ;  $(i_{ok})_{\text{оп}}$  – дискретные элементы переходной составляющей, полученные по формулам (1) в диапазоне ее исследования  $t'_n - t'^*_b$ .

Для идентификации сверхпереходной составляющей симметричного тока формируется рабочий массив от начала ПП до нижней границы  $t'_{n, \text{эф}}$  переходной составляющей по выражению (21), идентификация осуществляется по формуле (22)

$$i''_{o, j} = i_{o, j} - (i_{oj})_{\text{мод}} = i_{o, j} - 2\tilde{I}'_{0\text{эф}} \cdot e^{-(t'_{n, \text{эф}})_{\text{оп}}/\tilde{\tau}'_{\text{эф}}} - (2I_{\infty})_{\text{оп}}, \quad (21)$$

$$\tau''_{\text{эф}} = \frac{(t'_b - t''_n)}{\ln|i''_{o, n}/i''_{o, b}|}, \quad 2I''_0 = i''_{o, n} \cdot e^{t'_n/\tau''_{\text{эф}}}. \quad (22)$$

В случае сильной зашумленности ПП для идентификации сверхпереходной

составляющей проводят исследования по аналогии с переходной составляющей в соответствии с (10), (11), (12).

Идентификация апериодического тока якоря, представленного в дискретном виде, осуществляется также с использованием ЭТВ по формулам (6), (15), (16) и (23)

$$\tau_a = \frac{t_b - t_n}{\ln|i_{a.n}/i_{a.b}|}, I_{a.0} = i_{a.n} \cdot e^{t_n/\tau_a}, \text{ где } i_{a.b} = 0,33 \cdot i_{a.n}. \quad (23)$$

Исследования показывают, что наилучшей оценкой подтверждения точности и достоверности идентификации ПП СМ является величина среднеквадратичной погрешности приближения аналогично формуле (20)

$$\bar{\Delta}_K = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_1^K [(i_{ok})_{\text{мод}} - (i_{ok})_{\text{оп}}]^2}, \quad (24)$$

где  $(i_{ok})_{\text{мод}} = 2I''_{0\text{эф}} \cdot e^{-(t'_{н.эф})/\tau''_{эф}} + 2\tilde{I}'_{0\text{эф}} \cdot e^{-(t'_{н.эф})_{\text{оп}}/\tilde{\tau}'_{эф}} + (2I_{\infty})_{\text{опт}} -$  математическая модель дискретно заданного полного ПП, получаемая на базе ЭТВ с учётом оптимизации установившегося значения  $(2I_{\infty})_{\text{опт}}$  и нижней границей  $(t'_{н.эф})_{\text{опт}}$  в диапазоне  $t''_n - t'_b$  ПП;  $(i_{ok})_{\text{оп}}$  – дискретные элементы ПП, полученные по формулам (1) в диапазоне  $t''_n - t'_b$ .

Изложенные теоретические основы нового подхода (ВСМ) к исследованиям и идентификации ПП МСМ по результатам стендовых испытаний в опытах ВКЗ справедливы и для опытов ВН, ГП, УВ с учетом особенностей их проведения. Результаты идентификации для них представлены в 3 гл. диссертации. Исследовательский вариант теоретических основ нового подхода пригоден для проектирования, при серийном производстве СМ в объеме экспресс-методов, для совершенствования типов СМ, для их эксплуатации и ремонта.

**В третьей главе** приведены результаты апробации нового подхода в соответствии с разработанными ВСМ по результатам стендовых испытаний СМ в опытах ВКЗ, ВН, ГП для МСМ ТТК-50-2УЗ-П мощностью 50 МВт.

Идентификация ПП в опыте ВКЗ при уровне напряжения испытания  $0,7U_{\text{ном}}$  осуществлялась в соответствии с теоретическими основами гл. 2:

#### 1. Предварительная обработка первичной информации

В соответствии с алгоритмом (Рисунок 1) с использованием ЦЗО для представления дискретного ПП в цифровом виде (Рисунок 2,а), в виде вершин (Рисунок 2,б), в виде дискретных элементов между огибающими (симметричным током) вместе с асимметричным током с шагом дискретизации 0,01с (Рисунок 2,в).

2. Задание границ для проведения исследований и идентификации ПП СМ в одной из фаз всех уровней напряжений испытаний и величин установившихся значений тока якоря сделано согласно требованиям теории ПП и гл. 2 (таблица 1).

Таблица 1 – Задание границ исследуемого диапазона

| Напряжение испытания       | $\Delta T, \text{ с}$ | $t''_n = t_{a.n} = \Delta T, \text{ с}$ | $t'_n - t'_b, \text{ с}$ | $2I_{\infty}, \text{ о.е.}$ |
|----------------------------|-----------------------|---|--------------------------|-----------------------------|
| $0,7 \cdot U_{\text{ном}}$ | 0,0093                | 0,0093                                  | 0,7093–3,0693            | 0,746659                    |

3. Статистические исследования качества опытных данных проводят в порядке, представленном в гл. 2:

3.1. Формирование и определение свойств ГС случайного признака и выборки из нее представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Полная ГС до нормализации вариационного ряда

| Напр. испытания            | $K$ | $N$   | $\tilde{\tau}'_0, \text{ с}$ | $\sigma_0^2, \text{ с}^2$ | $(\tau'_{kj})_{\text{макс}}, \text{ с}$ | $(\tau'_{kj})_{\text{мин}}, \text{ с}$ | $R, \text{ с}$ | $\nu, \%$ |
|----------------------------|-----|-------|------------------------------|---------------------------|---|--|----------------|-----------|
| $0,7 \cdot U_{\text{ном}}$ | 237 | 27965 | 1,080355                     | 1690,456238               | 6856,52                                 | -335,60                                | 7192,12        | 3805,71   |

После нормализации вариационного ряда ГС случайного признака для продолжения исследований удалось снизить его объём до 26374 значений случайного признака с МО  $\tilde{\tau}'_0 = 0,816048$ , дисперсией  $\sigma_0^2 = 0,008998$  и размахом превышающим ожидаемое МО не более

1,5 раз, а для уровня испытания  $0,7U_{\text{ном}}$  размах соизмерим с МО. Изменение коэффициента вариации стало более стабильным. На рисунке 5 представлена гистограмма распределения нормализованной ГС случайного признака с целью визуального обнаружения предполагаемого нормального закона отклонения его от МО для уровня  $0,7U_{\text{ном}}$ . Аналогичные гистограммы строятся для всех уровней напряжений испытаний и представлены в диссертации.

3.2. При проверке гипотезы нормального закона распределения случайного признака в опыте ВКЗ при напряжении  $0,7U_{\text{ном}}$  расчёт критерия согласия Пирсона для объёма ГС случайного признака равного  $N = 26374$  со своим МО и дисперсией для минимального количества интервалов  $k = 5$  с учетом 2-х степеней свободы и уровнем значимости 0,05 составил  $\chi^2 = 0,720768 < 6$ , что меньше таблично заданного, гипотеза подтверждается (Рисунок 6).

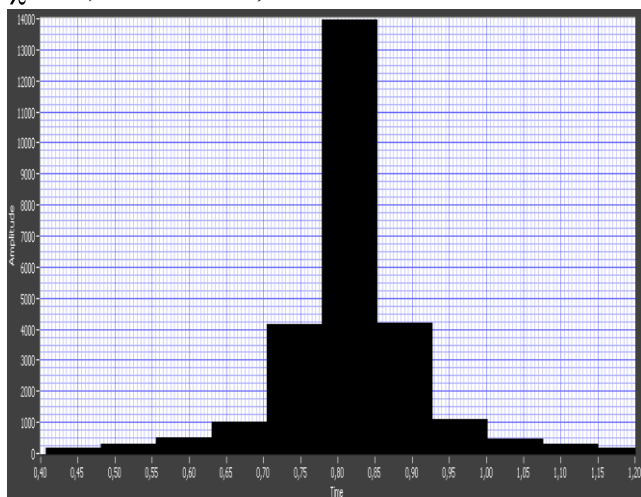


Рисунок 5 – Гистограмма нормализованной ГС случайного признака

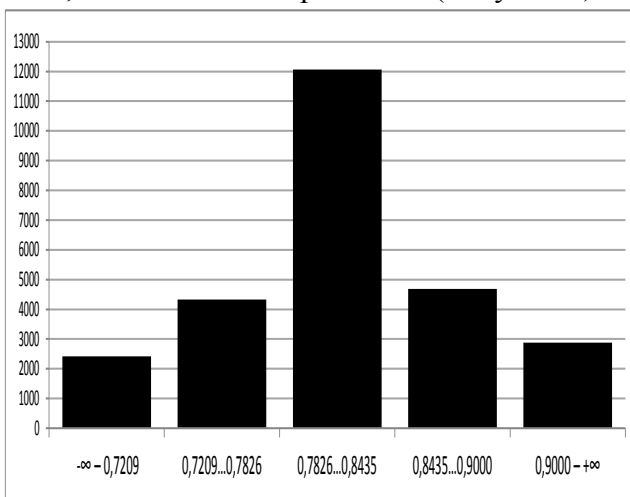


Рисунок 6 – Гистограмма по результатам расчетов критерия согласия Пирсона

3.3. Оценка уровня зашумлённости и степени отклонения случайного признака от экспоненциальности дает результаты соизмеримые с МО вариационных рядов и представлены в диссертации вместе с гистограммами.

3.4. Получение полного объема ЭТВ из вариационных рядов. Минимизация объема ЭТВ с учетом минимальной относительной погрешности отклонения ЭТВ от МО осуществлена с использованием распределения Пуассона (таблица 3).

Таблица 3 – Объемы ЭТВ

| Напряжение испытания       | Диапазон исследования $t'_H - t'_{B^*}$ , с | Генеральная совокупность |                 |   | Выборка           |                 |   |
|----------------------------|---|--------------------------|-----------------|---|-------------------|-----------------|---|
|                            |   | $N_{\text{норм}}$        | $n_{\text{эф}}$ | $n_{\text{эф}}$ при $ \tau_{\text{эф},j,k} - \tilde{\tau}'  \leq 3\%$ | $n_{\text{норм}}$ | $n_{\text{эф}}$ | $n_{\text{эф}}$ при $ \tau_{\text{эф},j,k} - \tilde{\tau}'  \leq 3\%$ |
| $0,7 \cdot U_{\text{ном}}$ | 0,7093-3,0693                               | 26374                    | 190             | 18  | 5577              | 25              | 25  |

Минимизация объема ЭТВ из четырех штук  $n_{\text{эф}} = 4$ , отклоняющихся с минимальным уровнем погрешности от МО, для всех уровней напряжений испытаний подтверждена с высокой степенью вероятности. Для уровня напряжения испытания  $0,7U_{\text{ном}}$  вероятность составила 0,9973 (0,9980 для опыта ВН; 0,9999 для опыта ГП).

3.5. Оценка близости свойств ГС и выборки из неё реализована с использованием свойств ЭТВ (таблица 4).

Таблица 4 – Вариационные ряды и их свойства

| Напр. испыт.               | $K$ | Генеральная совокупность |                       |                               | Выборка           |                       |                               | Минимизированный объём ЭТВ |                                 |   |
|----------------------------|-----|--------------------------|-----------------------|-------------------------------|-------------------|-----------------------|-------------------------------|----------------------------|---------------------------------|---|
|                            |     | $N_{\text{норм}}$        | $\tilde{\tau}'_0$ , с | $\sigma_0^2$ , с <sup>2</sup> | $n_{\text{норм}}$ | $\tilde{\tau}'_B$ , с | $\sigma_B^2$ , с <sup>2</sup> | $n_{\text{эф}}$            | $\tilde{\tau}'_{\text{эф}}$ , с | $\sigma_{\text{эф}}^2$ , с <sup>2</sup> |
| $0,7 \cdot U_{\text{ном}}$ | 237 | 26374                    | 0,816048              | 0,008998                      | 5577              | 0,805886              | 0,002115                      | 4                          | 0,829406                        | 0,000044                                |

4. Результаты апробации комбинаторных выражений с помощью минимизированного объема ЭТВ подробно представлены в диссертации в 2-х вариантах (таблица 5).

Таблица 5 – Результаты идентификации переходной составляющей

| Напряжение испытания       | $n_{\text{эф}}$ | Минимизированный объем ЭТВ для опытов с длительными ПП СМ |                                    |                              | Минимизированный объем ЭТВ для опытов с короткими ПП СМ |                                    |                              |
|----------------------------|-----------------|---|------------------------------------|------------------------------|---|------------------------------------|------------------------------|
|                            |                 | $\tilde{\tau}'_{\text{эф}}, \text{с}$                     | $\sigma^2_{\text{эф}}, \text{с}^2$ | $2\tilde{I}'_0, \text{о.е.}$ | $\tilde{\tau}'_{\text{эф}}, \text{с}$                   | $\sigma^2_{\text{эф}}, \text{с}^2$ | $2\tilde{I}'_0, \text{о.е.}$ |
| $0,7 \cdot U_{\text{НОМ}}$ | 4               | 0,829406  | 0,000044                           | 6,5460                       | 0,818039  | 0,000048                           | 6,6272                       |

5. Апробация нового оригинального метода минимизации среднеквадратичной погрешности приближения для переходной составляющей в исследуемом диапазоне ПП реализована в соответствии с разработанным методом и алгоритмом гл. 2. На рисунке 7 представлена погрешность приближения модели переходной составляющей к опытным данным в виде поверхности в трёхмерном измерении, которую удалось получить при одновременном варьировании в статистической дискретной функции (20) нижней границы участка переходной составляющей и установившегося значения тока якоря. На рисунках 7,а,в,г,д для уровня напряжения испытания  $0,7U_{\text{НОМ}}$  обнаружена минимально возможная погрешность в виде точки, для которой по ее проекциям в диссертации представлен подробный анализ результатов оптимизации установившегося значения тока (напряжения) якоря и нижней границы участка переходной составляющей, а также минимизации среднеквадратичной погрешности приближения.

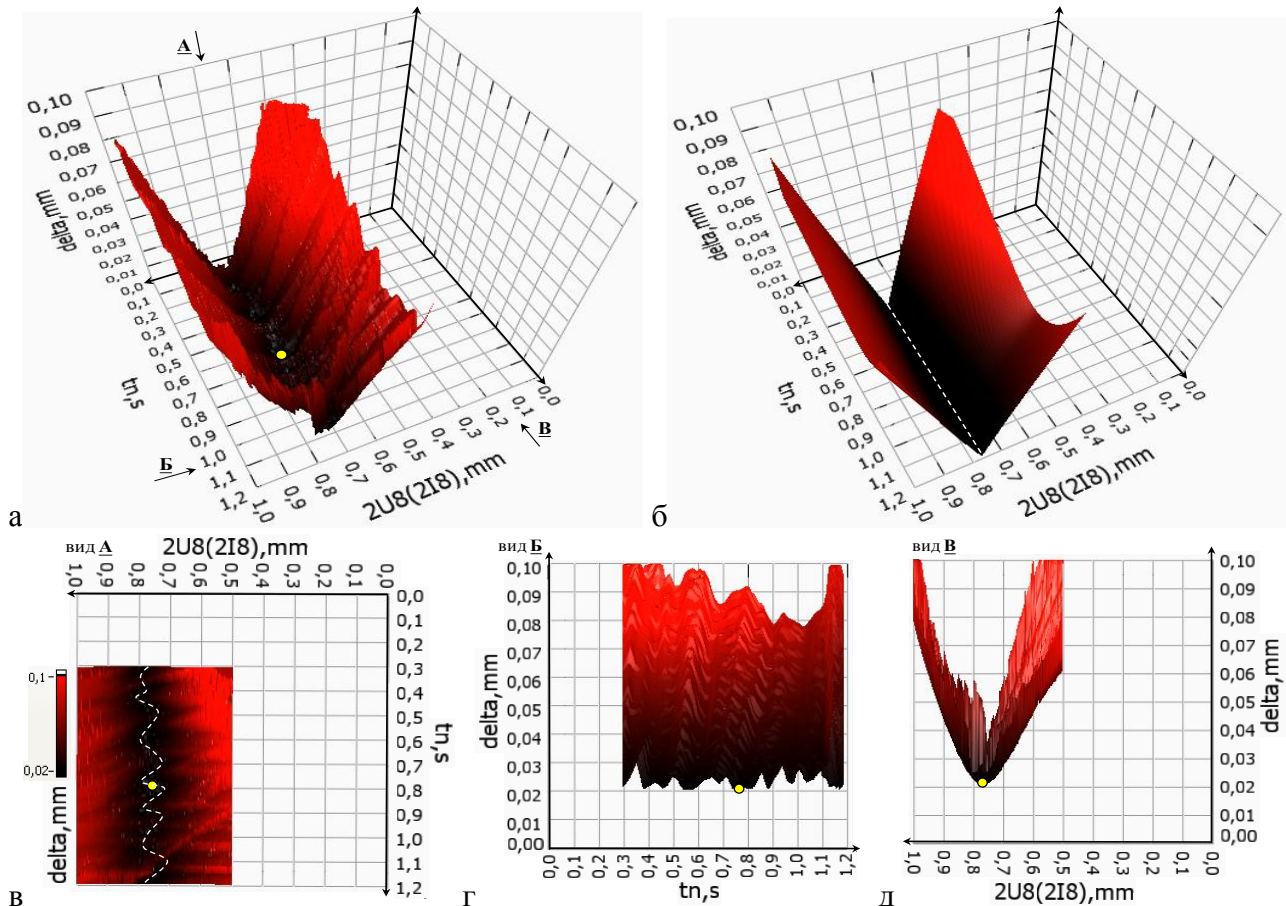


Рисунок 7 – Трёхмерная дискретная поверхность среднеквадратичных погрешностей приближения модели переходной составляющей к опытным данным ПП:

а – по опытным данным; б – по модели; в, г, д – проекции поверхности (а)

б. Идентификация сверхпереходной составляющей симметричного тока якоря в диапазоне  $t''_{\text{н.эф}} - t''_{\text{в.эф}} = 0,0093 - 0,0293$  с реализована в соответствии с методикой 2 гл. по формулам (21) и (22) с результатами  $\tilde{\tau}''_{\text{эф}} = 0,015067$  с и  $2\tilde{I}''_{0\text{эф}} = 2,5236$  о.е.

7. Идентификация асимметричного тока якоря в диапазоне  $t_{\text{а.н.эф}} - t_{\text{а.в.эф}} = 0,0093 - 0,2293$  с



реализована в соответствии с методикой 2 гл. по формуле (23) с результатами  $\tilde{\tau}'_a = 0,194513$  с и  $\tilde{I}_{a0} = 3,3639$  о.е.

8. Критериальная оценка точности идентификации переходного процесса реализована в соответствии с методикой 2 гл. по формуле (24) и при уровне напряжения испытания  $0,7U_{\text{ном}}$  составила  $\bar{\Delta}_{307} = 0,060351$ .

Аналогичные исследования проведены по данным стендовых испытаний для всех уровней напряжения испытания  $0,1U_{\text{ном}}$ ,  $0,2U_{\text{ном}}$ ,  $0,3U_{\text{ном}}$  в опытах ВКЗ, а также в опытах ВН, ГП, УВ, которые подтверждают высокую точность и достоверность ВСМ исследования и идентификацию ПП с учетом влияния различных случайных факторов.

**В четвертой главе** рассмотрен полный погрешностный анализ нового подхода к исследованию и идентификации ПП в опытах ВКЗ, ВН, ГП, УВ по результатам стендовых испытаний с учетом влияния различных случайных факторов.

Анализ по опытам ВКЗ показывает удовлетворительную сходимость МО вариационных рядов. Дисперсия лучше в выборках на порядок генеральных вариационных рядов. Размах случайного признака выше МО на 0,2–34% по уровням в генеральных вариационных рядах и несколько ниже в вариационных рядах выборок по тем же уровням напряжений испытания. Размахи случайного признака говорят о сильной зашумленности опытных данных, что отражается на разбросе результатов идентификации переходной составляющей симметричного тока якоря в опытах ВКЗ. Коэффициенты вариации выглядят более стабильными во всех уровнях напряжения испытания, кроме самого низкого  $0,1U_{\text{ном}}$ . Уровень коэффициентов вариации ниже у выборок за счет лучшей дисперсии.

Гипотеза нормального распределения случайного признака в сравниваемых рядах с использованием критерия согласия Пирсона («хи-квадрат») подтверждается для всех опытов. В процессе исследований нормального закона выявлены полный и минимизированный объемы ЭТВ с использованием распределения Пуассона для редких случайных событий до 4-х ЭТВ с высокой вероятностью (гл. 3).

Обоснованный минимизированный объем ЭТВ использован в качестве эталона при разработке способа близости свойств сравниваемых вариационных рядов случайного признака и при конструировании унифицированных комбинаторных выражений для идентификации переходной составляющей в опытах с короткими и длительными ПП СМ.

Идентификация асимметричного тока осуществлена аналогично сверхпереходной составляющей симметричного тока якоря с использованием ЭТВ.

Исследовано влияние установившегося значения тока (напряжения) якоря на результаты идентификации ПП СМ в опытах ВКЗ, ВН, ГП. В **опытах ВКЗ** установившееся значение тока якоря для разных уровней напряжения испытания занижено с 2,03 до 9,67 % от оптимизированного в условиях влияния случайных факторов. При этом погрешность приближения модели переходной составляющей к опытным данным на исследуемом участке ПП снижается в разы практически для всех уровней испытания данной СМ, а для уровня напряжения испытания  $0,7U_{\text{н}}$  она оказалась точнее в 3,6 раза. В **опыте ВН** несмотря на незначительное увеличение установившегося значения напряжения после его оптимизации (всего на 0,268 %), оно очень существенно снизило погрешность приближения модели переходной составляющей симметричного напряжения к её опытным данным (на 29,4%). В **опыте ГП** оптимизация напряжения якоря от остаточного намагничивания снизила погрешность приближения модели переходной составляющей к её опыту более чем в 3 раза.

Исследовано влияние нижней границы для переходной составляющей на результаты идентификации ПП СМ. В **опытах ВКЗ** после оптимизация заданной нижней границы для переходной составляющей (исследуемой фазы при уровне напряжения  $0,7U_{\text{н}}$ ) снизила погрешность приближения модели переходной составляющей симметричного тока к её опытным данным на 26 %. В **опыте ВН** получено снижение среднеквадратичной

погрешности для переходной составляющей  $\overline{\Delta}'_k$  на 37,6%, а для полного ПП  $\overline{\Delta}_k$  на 22,88%. В **опытах ГП** (для наиболее длительного ПП при разомкнутой обмотке якоря без гасительного сопротивления) в результате оптимизации получено снижение среднеквадратичной погрешности для переходной составляющей  $\overline{\Delta}'_k$  на 29,15%, а для всего ПП  $\overline{\Delta}_k$  на 27,00%.

Исследовано влияние изменения шага дискретизации на точность идентификации длительных ПП СМ. С укрупнением шага дискретизации ПП, погрешность приближения модели полного ПП в **опытах ВН** к его опытным данным практически не изменяется, но не следует сильно увеличивать шаг дискретизации из-за возможного снижения достоверности идентификации при сильном зашумлении ПП. Укрупнение шага дискретизации в длительных ПП в **опытах ГП** с разомкнутой обмоткой якоря без гасительного сопротивления наблюдается постепенное нарастание погрешностей приближения модели составляющих и всего ПП к их опытным данным из-за преобладания зашумлённых опытных данных в конце затухания всего ПП, снижающих общую погрешность приближения.

Для разработанного нового оригинального метода минимизации среднеквадратичной погрешности приближения модели переходной составляющей симметричного тока якоря СМ к опытным данным выявлено влияние изменения шагов вариации установившегося значения напряжения (тока) и нижней границы исследуемого диапазона ПП на оценку машинного времени с представлением погрешности приближения в виде поверхности в трехмерной системе координат в различных опытах. Подробный анализ представлен в диссертации.

**В пятой главе** рассмотрены возможности ВСМ.

В главе представлен новый подход экспресс-оценки ударного тока по результатам стендовых испытаний СМ в опытах ВКЗ без получения параметров идентификации ПП. Оценка ударного тока реализована по первому элементу дискретного ПП  $i_{o1}$  на первом шаге дискретизации  $\Delta T$  и рассчитана как разность между элементом и интерполяционным значением тока якоря в данном узле  $\Delta T$ :

$$i_{уд.оп}(\Delta T) = |i_{o1}(\Delta T) - i_{ил}(\Delta T)| = I_{в1}(\Delta T). \quad (25)$$

Экспресс-оценка ударного тока ПП в узле  $\Delta T$ , полученная ВСМ для исследуемой СМ ТТК-110-2-УЗ-П мощностью 110 МВт при разных уровнях напряжения якоря по опытным данным без определения параметров идентификации ПП в опыте ВКЗ по формуле (25), подтверждается высокой сходимостью. Расчёт симметричных и асимметричных составляющих полного ударного тока в узле  $\Delta T$  ВСМ с использованием параметров идентификации ПП в этом же опыте при разных уровнях напряжения якоря также подтверждаются высокой сходимостью с расчётами по опытным данным. Для уровня напряжения испытания  $0,7U_n$  первая вершина для ПП в фазе «А» оказалась сдвинутой от начала ПП на величину равную 0,01с (что совпало с требованиями стандарта) и расчёт ударного тока совпал с расчётом по новому подходу. Погрешность определения ударного тока после истечения 0,01 с от начала ПП по стандарту в данных испытаниях составила от 1 до 6 %, которая в зависимости от уровня напряжения испытания равна сотням и более А. Аналогичная погрешность определения симметричных и асимметричных токов по стандарту составила от 1,53 до 5,12 % и от 0,63 до 12,64 % соответственно.

Развитием возможностей ВСМ является алгоритм расчёта по данным опыта ВКЗ сверхпереходных и переходных индуктивных сопротивлений по поперечной оси  $q$  неявнополюсных СМ с исследованием причин их отклонения от сопротивлений по продольной оси. Для исследований использовались данные стендовых испытаний МСМ ТТК-50-2УЗ-П на 50 МВт в опытах ВКЗ для напряжений испытаний  $(0,1; 0,2; 0,3; 0,7) \cdot U_n$ . Анализ результатов исследования подтверждает существенный разброс сверхпереходных индуктивных сопротивлений по осям  $d$  и  $q$ , достигающий при уровне напряжения испытания 0,1 до 17% для ненасыщенного режима работы СМ и до 30% для уровня  $0,7U_n$ , при котором

для СМ возможен переход в режим насыщения. Практическое равенство сопротивлений  $x_d'' \approx x_q''$  наступает при отклонениях напряжений от заданных уровней испытания до 40-45% для ненасыщенного режима и до 45-50% в режиме насыщения ( $0,7U_n$ ) СМ. Лучшие результаты исследования принадлежат переходным сопротивлениям для всех уровней напряжений испытания, при этом разброс и сходимости сопротивлений составляет менее 10%. Такой разброс объясняется в основном трудностью точного установления уровней напряжений при испытаниях и асимметрией СМ по причинам конструктивного и технологического характера и ряда других причин.

В главе был апробирован способ идентификации параметров ПП исследуемой в 3 гл. СМ мощностью 50 МВт. Этот ПП протекал в фазе, данные по которой отсутствовали и были получены из условия  $i_A + i_B + i_C = 0$ . Такой подход требует дополнительных исследований.

Был исследован переходный процесс турбогенератора ТГ-110 мощностью 110 МВт, с номинальным напряжением статора 10,5 кВ и номинальным током 7560,5 А в опытах ВКЗ с применением ЦЗО. В таблице 6 приведено сравнение индуктивных сопротивлений в одной из фаз ТГ-110, полученных ГАМ, ВСМ и расчетом в процессе проектирования СМ.

Таблица 6 – Результаты идентификации переходного процесса

| Параметры      | ГОСТ (ГАМ)      | ВСМ            | Расчет при проектировании |
|----------------|-----------------|----------------|---------------------------|
| $x_d'$ , о.е.  | 0,3376 (26,11%) | 0,2861 (6,87%) | 0,2677                    |
| $x_d''$ , о.е. | 0,2524 (17,23%) | 0,2148 (0,23%) | 0,2153                    |

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненная диссертационная работа представляет собой дальнейшее развитие научных исследований, выполняемых на кафедре «Электротехника и электромеханика», в области исследования и идентификации ПП МСМ. К основным теоретическим и практическим результатам выполненной работы относится следующее:

1. Выполнен анализ состояния методов исследования ПП СМ с обоснованием нового подхода к исследованию и идентификации ПП МСМ с использованием элементов теории вероятностей и математической статистики.

2. Систематизирован новый подход к исследованиям и идентификации ПП МСМ по результатам стендовых испытаний, в объеме программы приемочных испытаний по отечественным и международным стандартам, завершившийся разработкой ВСМ на базе элементов теории вероятностей и математической статистики, позволяющий в условиях влияния различных случайных факторов осуществлять идентификацию ПП из опытов ВКЗ, ВН, ГП, УВ с высокой точностью и достоверностью, что требует из-за использования ЦЗО дополнительной обработки первичной информации, в результате чего: разработаны и исследованы эффективные способы сжатия используемого объема первичной информации дискретно заданных ПП СМ; усовершенствованы способы аналитического выделения вершин и дискретных огибающих, разделения на составляющие симметричных ПП, полностью исключающих трудоемкие операции методов действующих стандартов.

3. На базе элементов теории вероятностей и математической статистики разработан новый метод статистических исследований с качественным анализом влияния опытных данных ПП СМ в исследуемом диапазоне с переходной составляющей на свойства случайного признака, который позволяет: формировать на основе ранее полученного базового случайного признака по опытным данным ГС случайного признака и выборку из нее; формировать по ГС случайного признака и выборке из нее вариационные ряды с определением их свойств; подтверждать по свойствам вариационных рядов гипотезу предполагаемого нормального закона распределения случайного признака относительно МО с использованием критерия согласия Пирсона; оценивать по свойствам вариационных рядов уровень зашумленности и отклонения случайного признака от экспоненциального затухания переходной составляющей симметричного тока якоря, их размахи и коэффициенты

вариации; минимизировать объем ЭТВ с использованием распределения Пуассона для редких случайных событий; оценивать близость свойств вариационных рядов ГС и выборки из нее с использованием базовых свойств минимизированного объема ЭТВ; модернизировать унифицированные комбинаторные выражения для исследования и идентификации переходной составляющей симметричного тока якоря СМ.

4. Разработан новый оригинальный метод минимизации среднеквадратичной погрешности приближения модели переходной составляющей симметричного тока (напряжения) якоря в исследуемом диапазоне ПП к ее опытным данным с учётом влияния различных случайных факторов с визуальным представлением этой погрешности дискретной поверхностью в трехмерной системе координат, что эффективно повышает точность и достоверность идентификации не только переходной составляющей, но и всего ПП МСМ.

5. Разработан метод эффективной и точной оценки ударного тока из опыта ВКЗ по вершине для узла  $\Delta T$  ПП без определения параметров СМ из данного опыта, существенно снижающий трудоемкость оценки ударного тока.

6. Разработана оценка коррекции погрешности смещения первых 5-6 вершин ПП в опытах ВКЗ.

7. Разработан метод определения индуктивных сопротивлений по оси  $q$  с оценкой их отклонения относительно индуктивных сопротивлений по оси  $d$  по результатам стендовых испытаний в опыте ВКЗ.

8. Использование ЦЗО при стендовых испытаниях СМ позволило идентифицировать ПП в опытах ГП из единой его записи.

9. Разработан комплекс рабочих алгоритмов и программ в программно-инструментальной среде LabVIEW с привлечением электронных таблиц Microsoft Excel, позволяющих осуществлять полный цикл исследования, идентификации и экспресс-обработки ПП МСМ в опытах ВКЗ, ВН, ГП, УВ в объёме требований отечественных и международных стандартов с учетом особенностей их проведения.

Эффективность разработанного в диссертации нового подхода к исследованию и идентификации ПП МСМ подтверждена высокоточными и достоверными результатами проведенных исследований при идентификации ПП в опытах ВКЗ, ВН, ГП в соответствии с разработанным комплексом рабочих алгоритмов и программ, учитывающий **рекомендации**:

1. С целью получения высокоточных и достоверных результатов идентификации переходной составляющей разработан новый оригинальный метод минимизации среднеквадратичной погрешности приближения модели переходной составляющей в исследуемом диапазоне ПП с одновременной оптимизацией установившегося значения тока (напряжения) якоря и нижней границей участка переходной составляющей.

2. С целью снижения трудоемкости с сохранением точности и достоверности идентификации ПП возможно укрупнение шага дискретизации элементов между огибающими при исследовании длительных ПП (ВН и ГП).

3. С целью уменьшения времени обработки с сохранением точности и достоверности идентификации ПП возможно укрупнение шага вариации, которое позволяет получить гладкую поверхность с ярко выраженным «желобом» минимальных погрешностей и уменьшает время поиска экстремума, но при очень крупных шагах абсолютный минимум может быть утерян (он может оказаться за пределами применяемого шага). Методика позволяет изменять величину шага от крупного (на краю исследуемой области, т.е. на склоне «желоба», где заведомо абсолютный экстремум отсутствует), до мелкого (по мере приближения ко дну «желоба»), причем шаг можно уменьшать по мере приближения к абсолютному минимуму. Методика также позволяет варьировать установившееся значение и нижнюю границу с различными независимыми друг от друга шагами, а также позволяет применять другие известные способы изменения шага.

4. Для определения сдвига первой вершины ПП относительно его начала  $\Delta T$  необходимо использовать возможности ЦЗО.

5. С целью снижения трудоемкости с сохранением точности и достоверности величину ударного тока якоря в соответствии с новым подходом экспресс-оценки можно оценивать без определения результатов идентификации ПП.

6. С целью снижения погрешности приближения разработанный ВСМ позволяет в опытах ВКЗ скорректировать сдвиг первых 5-6 вершин.

Тема диссертации имеет следующие **перспективы**:

1. Исследовать возможности для поиска связи между составляющими ПП и сдвигом первой вершины ПП относительно его начала  $\Delta T$ .

2. Применение ВСМ для определения параметров по переходным функциям с учетом многоконтурности ротора СМ.

3. Исследовать возможность использования ВСМ для идентификации ПП без использования записи в обмотке возбуждения.

4. Продолжить исследования с целью развития метода экспресс-оценки ударного тока якоря без получения и использования параметров идентификации ПП.

5. Продолжить исследования с целью развития способов определения всех индуктивных сопротивлений по поперечной оси СМ из опытов ВКЗ.

6. Исследовать с помощью ВСМ возможность оптимизации воздушного зазора СМ при их проектировании по результатам идентификации величин индуктивных сопротивлений по осям  $d$  и  $q$ , связанных с ее габаритами и энергетическими показателями.

7. Исследовать возможность восстановления отсутствующей фазы по двум записанным по результатам стендовых испытаний в опыте ВКЗ с целью ее идентификации.

8. Высокоточные и достоверные результаты идентификации ПП СМ могут быть эффективно использованы для предотвращения аварийных ситуаций в самих СМ и вне их при работе в системах энергообеспечения.

## **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Статьи в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК:**

1. Чабанов Е.А. Модернизация вероятностно-статистических методов исследования переходных процессов мощных синхронных машин / Судаков А.И., Чабанов Е.А., Шулаков Н.В. // Электротехника. - 2010. - № 6. - С. 20-26. (0,4 п.л. / 0,3 п.л.)

2. Чабанов Е.А. Вероятностно-статистические методы исследования переходных процессов мощных синхронных машин / Судаков А.И., Чабанов Е.А., Шулаков Н.В. // Электротехника. - 2010. - № 8. - С. 22-29. (0,5 п.л. / 0,3 п.л.)

3. Чабанов Е.А. К вопросам исследования и идентификации переходных процессов мощных синхронных машин вероятностно-статистическими методами / Судаков А.И., Чабанов Е.А., Шулаков Н.В. // Электричество. - 2013. - № 3. - С. 34-39. (0,4 п.л. / 0,2 п.л.)

4. Чабанов Е.А. Новые подходы к идентификации переходных процессов синхронных машин в опытах внезапного симметричного короткого замыкания вероятностно-статистическими методами / Судаков А.И., Чабанов Е.А., Шулаков Н.В. // Интеллектуальные системы в производстве. - 2013. - № 2(22). - С. 207-213. (0,4 п.л. / 0,2 п.л.)

5. Чабанов Е.А. Развитие возможностей вероятностно-статистических методов достоверной идентификации длительных переходных процессов мощных синхронных машин в опытах гашения поля / Судаков А.И., Чабанов Е.А., Шулаков Н.В., Шутемов С.В. // Интеллектуальные системы в производстве. - 2013. - № 2(22). - С. 213-220. (0,5 п.л. / 0,3 п.л.)

6. Chabanov Evgenii A. Novel approaches to analysis of transition processes identification error by probability-statistical methods during sudden symmetric short-circuit tests of synchronous machines / Sudakov Anatolii I., Chabanov Evgenii A., Shulakov Nikolai V. // Acta Technica CSAV (Ceskoslovensk Akademie Ved). Volume 58 (2013). Number 4. P. 381–392. (0,8 п.л. / 0,5 п.л.)

7. Чабанов Е.А. Новые подходы достоверного определения ударного тока якоря синхронной машины / Чабанов Е.А., Судаков А.И. // Электротехника. - 2014. - № 11. - С. 42-46. (0,3 п.л. / 0,2 п.л.)

8. Чабанов Е.А. Метод точной оценки косвенно определяемых величин в

электромеханике / Чабанов Е.А., Судаков А.И. // Информационно-измерительные и управляющие системы. - 2014. - № 9. - С. 62-70. (0,6 п.л. / 0,4 п.л.)

9. Чабанов Е.А. Вероятностно-статистические методы идентификации синусоидально возрастающих переходных процессов синхронных машин / Чабанов Е.А., Судаков А.И., Турпак А.М., Лоскутников В.А.// Фундаментальные исследования. -2014. - № 12 (10). - С. 2135-2141. (0,4 п.л. / 0,3 п.л.)

#### Другие публикации:

10. Чабанов Е.А. Надежность электрических машин: учеб. пособие / Судаков А.И., Чабанов Е.А.; Перм. гос. техн. ун-т. - Пермь : изд-во ПГТУ, 2009. - 332 с. (20,7 п.л./7,5 п.л.)

11. Чабанов Е.А. Новые подходы к получению исходной информации и методам идентификации переходных процессов мощных синхронных машин / Шулаков Н.В., Судаков А.И., Чабанов Е.А. // Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. - 2013. - № 8. - С. 114-127. (0,5 п.л. / 0,4 п.л.)

12. Чабанов Е.А. Новые подходы к погрешностному анализу результатов исследования и идентификации переходных процессов мощных синхронных машин / Судаков А.И., Чабанов Е.А., Шутемов С.В. // Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. - 2013. - № 8. - С. 166-172. (0,4 п.л. / 0,3 п.л.)

13. Чабанов Е.А. Исследования проблем идентификации переходных процессов мощных синхронных машин вероятностно-статистическими методами / Судаков А.И., Чабанов Е.А., Давлетбаева Г.Н., Субботина В.А. // Актуальные вопросы науки: мат. XIII Междунар. научно-практ. конф., Москва, 25 апр. 2014г. / ООО «Издательство «Спутник+», 2014. -С. 92-95. (0,3 п.л./0,2 п.л.)

14. Чабанов Е.А. Исследования случайного признака на соответствие гипотезе нормального распределения при идентификации переходных процессов электрических машин / Судаков А.И., Чабанов Е.А. // XXXI научно-техническая конференция горно-нефтяного факультета ПГТУ: тез. докл./М-во обр. РФ, Перм. гос. техн. ун-т. - Пермь, 2002. - С. 141-142. (0,13 п.л. / 0,1 п.л.)

15. Чабанов Е.А. Оценка результатов идентификации переходных процессов синхронных машин статистическими методами / Судаков А.И., Чабанов Е.А. // Электрические машины и электромашинные системы: Сб. науч. тр. / ПГТУ. - Пермь, 2003. - С. 89-95. (0,4 п.л./0,2 п.л.)

16. Чабанов Е.А. Идентификация переходных процессов синхронных машин вероятностно-статистическими методами / Судаков А.И., Чабанов Е.А.//Вестник УГТУ-УПИ. - № 5 (25). Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы. -Ч.1. -Екатеринбург, 2003. - С.349-354. (0,4 п.л./0,2 п.л.)

17. Чабанов Е.А. Идентификация переходных процессов электрических машин вероятностными методами и методами математической статистики (новые подходы)/Судаков А.И., Чабанов Е.А.//Электромеханика, Электротехнологии, Электроматериаловедение: МКЭЭЭ-2003. Ч.1 / 5-я Междунар. конф. - Крым, Алушта, 2003. - С.361-364. (0,3 п.л. / 0,2 п.л.)

18. Chabanov E.A. The express estimation of value of an impact current of short circuit of synchronous machines/Sudakov A.I., Chabanov E.A.//Unconventional electromechanical and electrical systems/Sixth international conference. Alushta, Ukraine, Sept. 24-29, 2004. -Alushta, 2004. -P. 415-418. (0,3 п.л. / 0,2 п.л.)

19. Чабанов Е.А. Вероятностно-статистические методы и эффективные точечные выборки при исследовании и идентификации переходных процессов синхронных машин / Судаков А.И., Чабанов Е.А.//Мат. XXXIII научно-практ. конф. ГНФ ПГТУ. -Пермь, 2004. -С.244-248. (0,3 п.л./0,1 п.л.)

20. Чабанов Е.А. Экспресс-оценка величины ударного тока короткого замыкания синхронных машин новым методом / Судаков А.И., Чабанов Е.А. // Электрические машины и электромашинные системы: Сб. науч. тр. / Перм. гос. техн. ун-т. -Пермь, 2005. -С. 43-48. (0,4 п.л./0,2 п.л.)

21. Чабанов Е.А. Идентификация переходных процессов графоаналитическим и

вероятностно-статистическими методами мощных турбогенераторов в условиях завода-изготовителя / Судаков А.И., Чабанов Е.А. // Электромеханика, Электротехнологии, Электротехнические материалы и Компоненты : XI Междунар. конф., 18.09.2006.-Крым, Алушта, 2006. -Ч. 1. -С. 274-276. (0,2 п.л. / 0,1 п.л.)

22. Чабанов Е.А. Возможности вероятностно-статистических методов идентификации переходных процессов синхронных машин / Судаков А.И., Чабанов Е.А. // Информационные управляющие системы: сб. науч. тр. / М-во обр. и науки РФ, ПГТУ-Пермь. ЦНТИ, 2006. - С.123-130. (0,5 п.л. / 0,2 п.л.)

23. Чабанов Е.А. Компьютерная идентификация переходных процессов синхронных машин вероятностными методами / Судаков А.И., Чабанов Е.А. // Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий : тр. Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием, Екатеринбург, 19-21 апр. 2006г. / ГОУ ВПО УГТУ-УПИ. - Екатеринбург, 2006. - С. 247-253. (0,4 п.л. / 0,2 п.л.)

24. Чабанов Е.А. Использование эффективных точечных выборок для исследования переходных процессов синхронных машин / Судаков А.И., Чабанов Е.А. // Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы: тр. III Междунар.науч.-практ.конф./УГТУ-УПИ.-Екатеринбург,2007.-С.163-168. (0,4 п.л. / 0,3 п.л.)

25. Чабанов Е.А. Методы оценки погрешности осциллографирования переходных процессов СМ вероятностно-статистическими методами/Судаков А.И., Чабанов Е.А.// Электромеханика, Электротехнологии, Электротехн. материалы и Компоненты: тр. XII Междунар. конф., Крым, г.Алушта, 29 сент.-4окт. 2008г. / М-во обр. и науки РФ, МЭИ. -М., 2008. -С.168-169. (0,13 п.л. / 0,1 п.л.)

26. Чабанов Е.А. Исследования влияния способов преобразования аппаратно получаемой цифровой информации на эффективность и точность идентификации переходных процессов мощных синхронных машин/Судаков А.И., Чабанов Е.А. // Энергетика. Инновационные направления в энергетике. CALS-технологии в энергетике: материалы III всерос. научно-техн. интернет-конф., г. Пермь, 2-30 нояб. 2009 г. / Федер. агентство по обр. -Пермь: Изд-во ПГТУ, 2010. -С.189-195. (0,4 п.л. / 0,3 п.л.)

27. Chabanov E.A. Complex for processing the results of powerful synchronous machines testing in transient regimes / Bogdanov V.G., Sudakov A.I., Chabanov E.A., Shulakov N.V. // ICEEE-2010: abstr. 13th intern. conf. on electromechanics, electrotechnology, electromaterials and components, Alushta, Crimea, 19-25 sept. 2010: тез. докл / [МЭИ (ТУ)]. - Alushta,2010. -р.86. (0,1 п.л./0,05 п.л.)

28. Чабанов Е.А. Исследования по идентификации переходных процессов мощных синхронных машин с минимальной погрешностью приближения статистической модели к результатам стендовых испытаний/Судаков А.И., Чабанов Е.А.//Инженерные, научные и образовательные приложения на базе технологий National Instruments:мат.Хнауч.-практ.конф.,8-9дек.2011г.: сб.тр. / Мин.обр.и науки РФ, РУДН, Фил. компании NI.-Москва:ДМК-пресс,2011.-С.194-196. (0,2 п.л. / 0,1 п.л.)

29. Чабанов Е.А. Вероятностно-статистические методы обработки переходных процессов мощных синхронных машин по результатам стендовых испытаний/Судаков А.И., Чабанов Е.А., Шулаков Н.В. // Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы: сб. науч. тр. IV Междунар. науч.-техн. конф./М-во обр. и науки РФ, УрФУ им. первого Президента России Б.Н.Ельцина.-Екатеринбург,2011.-С.256-260. (0,3 п.л. / 0,2 п.л.)

30. Чабанов Е.А. Возможности вероятностно-статистического метода обработки переходных процессов синхронных машин / Судаков А.И., Чабанов Е.А. // Инновационные технологии: теория, инструменты, практика: мат. II Междунар. интернет-конф. мол. учен., аспирантов, студентов (01.11.–01.12. 2010 г.)/М-во обр. и науки РФ. - Пермь: Изд-во ПГТУ, 2011. - С. 140-148. (0,6 п.л./0,3 п.л.)

31. Чабанов Е.А. Новые подходы к вопросам исследования и идентификации переходных процессов мощных синхронных машин вероятностно-статистическими методами / Судаков

А.И., Чабанов Е.А., Шулаков Н.В. // Электромеханика, Электротехнологии, Электротехнические материалы и Компоненты (МКЭЭЭ-2012): тр. XIV Междунар. конф., Крым, Алушта, 23-29 сент. 2012г./М-во обр. и науки РФ, Науч.-исслед. ун-т МЭИ. -[Б.м.],2012. -С.113-115.(0,2 п.л./0,1 п.л.)

32. Chabanov E.A. Novel approaches to analysis of transition processes identification error by probability-statistical methods during sudden symmetric short-circuit tests of synchronous machines / Sudakov A.I., Chabanov E.A., Shulakov N.V.//International Symposium on Theoretical Electrical Engineering: Pilsen, Czech Republic, 24-26 June 2013/Univ. of West Bohemia, 2013. - P.III-25–III-26. (0,13 п.л. / 0,1 п.л.)

33. Chabanov E.A. Novel approaches to analysis of transition processes identification error by probability-statistical methods during sudden symmetric short-circuit tests of synchronous machines / A.I. Sudakov, E.A. Chabanov, N.V. Shulakov // ISTET 2013. International Symposium on Theoretical Electrical Engineering : [Electronic resource] : Appendix of the Conference Proceedings : [Abstract and Paper], Pilsen, Czech Republic, 24th - 26th June 2013/ Univ. of West Bohemia. - Pilsen : Univ. of West Bohemia, 2013. - 1 electronic optical disc (CD-ROM) : 2 p. - Title from screen. (0,13 п.л. / 0,1 п.л.)

34. Chabanov E.A. Novel approaches to analysis of transition processes identification error by probability-statistical methods during sudden symmetric short-circuit tests of synchronous machines / A.I. Sudakov, E.A. Chabanov, N.V. Shulakov // ISTET 2013. International Symposium on Theoretical Electrical Engineering : [Electronic resource] : Appendix of the Conference Proceedings : [Abstract and Paper], Pilsen, Czech Republic, 24th - 26th June 2013/Univ. of West Bohemia. -Pilsen: Univ. of West Bohemia, 2013. -1 electronic optical disc (CD-ROM): 6 p. -Title from screen. (0,4 п.л./0,3 п.л.)

35. Чабанов Е.А. Вероятностно-статистические методы анализа переходных процессов мощных синхронных машин / Крылова И.А., Судаков А.И., Чабанов Е.А. // Инновационные технологии: теория, инструменты, практика InnoTech 2013: мат. V Междунар. интернет-конф. молодых ученых, аспирантов, студентов, Пермь, 1-30 нояб. 2013 г. / ПНИПУ, 2013. - С. 179-188. (0,6 п.л. / 0,3 п.л.)

36. Чабанов Е.А. Экспресс-оценка ударного тока мощных синхронных машин / Судаков А.И., Чабанов Е.А., Шулаков Н.В., Крылова И.А. // Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий АПЭЭТ-2014: сб. науч. тр. III Междунар. научно-техн. конф., Екатеринбург, 17-20 март. 2014 г. / УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2014. - С. 226-229. (0,3 п.л. / 0,2 п.л.)

Заказ № \_\_\_\_\_. Формат 60x84 1/16. Бумага тип. № 1.

Отпечатано на ризографе уч.-изд. л. 2,0. Тираж 100 экз.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Типография ПНИПУ

614990, Пермский край, г. Пермь - ГСП, Комсомольский проспект, д. 29