



На правах рукописи

ПОЛИЩУК ВЛАДИМИР ИОСИФОВИЧ

Развитие теории построения систем диагностики синхронных машин

Специальность 05.09.01 – «Электромеханика и электрические аппараты»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Самара – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Самарский государственный технический университет» на кафедре «Электроснабжение промышленных предприятий».

Научный консультант – доктор технических наук, профессор,
Сергеев Виктор Леонидович

Официальные оппоненты: **Ковалев Владимир Захарович**
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой энергетики ФГБОУ ВО
«Югорский государственный университет»
(г. Ханты-Мансийск)

Богдан Александр Владимирович
доктор технических наук, доцент, профессор
кафедры электротехники, теплотехники и
возобновляемых источников энергии ФГБОУ
ВО «Кубанский государственный аграрный
университет имени И.Т. Трубилина»
(г. Краснодар)

Шевченко Александр Федорович
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой электромеханики
ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный
технический университет» (г. Новосибирск)

Ведущая организация – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский Федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (г. Екатеринбург)

Защита диссертации состоится 02 марта 2017 года в 15:00 на заседании объединенного диссертационного совета ДМ212.178.03 при Омском государственном техническом университете и Омском государственном университете путей сообщения. Защита пройдет в Омском государственном техническом университете по адресу: 644050, г. Омск, пр. Мира, 11, корп.6, ауд. 340. Тел/факс (3812) 65-34-07, e-mail: dissov_omgtu@omgtu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Омского государственного технического университета и на сайте omgtu.ru.

Автореферат разослан 15 декабря 2016 года.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 644050, г. Омск, пр. Мира 11, ученому секретарю объединенного диссертационного совета ДМ212.178.03

Ученый секретарь объединенного
диссертационного совета ДМ212.178.03
канд. техн. наук



О.А. Лысенко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Увеличение срока службы, единичной мощности и появляющиеся за время эксплуатации схемные и конструктивные осложнения вносят значительные затруднения в определение технического состояния синхронных машин (СМ) при принятии решения по управлению, обслуживанию и ремонту. В тоже время в современных условиях к СМ, в особенности к турбогенераторам, предъявляются все более высокие требования по надежности. Определение технического состояния СМ не является простой задачей, которую можно было бы решить путем проведения типовых профилактических испытаний. Специфической особенностью электроэнергетики является желательное устранение дефектов генерирующего оборудования в период плановых ремонтов. Вывод генератора во внеплановый ремонт наносит электрогенерирующей организации существенный экономический ущерб. Конечной целью технической диагностики является устранение дефекта. Вместе с тем необходимо учитывать, что только заблаговременное обнаружение дефекта до возможного отказа машины является главным аргументом, оправдывающим затраты на систему диагностики.

Скрытность причинно-следственных связей присуща практически всем видам дефектов электрооборудования, а выявление такого повреждения, как витковое замыкание (ВЗ) в обмотке ротора СМ, является одной из трудных научных задач технической диагностики, поскольку нет диагностической информации, измеряемой штатными средствами, которая была бы однозначно связана с состоянием межвитковой изоляции. Научную задачу достоверного выявления витковых и двойных на землю замыканий в обмотке ротора синхронных машин неоднократно ставилась перед научным и инженерным сообществом на сессиях СИГРЭ, поскольку данный вид дефекта вызывает ряд негативных эффектов:

- неравномерность магнитного тяжения ротора, т.е. магнитную дисбалансировку и механические вибрации ротора;
- появление паразитных токов, протекающих через подшипники скольжения, что резко снижает ресурс подшипников и масла;
- появление больших электрических потерь, которые негативно сказываются на величине вырабатываемой генератором энергии;
- возникновение термического дисбаланса;
- перегрев закороченных витков, что может привести к пробое изоляции на землю с вероятностью второго замыкания на землю.

Впервые работоспособный способ мониторинга технического состояния межвитковой изоляции был предложен в 1970 г. D.R. Albright. Способ заключался в установке индукционного магнитометрического датчика в воздушный зазор неявнополюсного турбогенератора, и по осциллограмме определялось снижение плотности тока над пазом с замыканием. Значительный вклад в решение задачи выявления виткового замыкания в

обмотке ротора синхронных генераторов внесли отечественные учёные И.А. Глебов, Я.Б. Данилевич, М.Б. Ройтгарц, В.И. Поляков, а также зарубежные ученые D.R. Albright, J.W. Wood, R.T. Hindmarch, R.J. Jackson, I.A. Roberts, R.C. Thurston, J.H. Worsfold и др.

Еще сложнее обстоит дело с разработкой релейной защиты от виткового замыкания в обмотке ротора СМ. Только в турбогенераторах до 160 МВт для защиты от замыканий на землю во второй точке используют переносной комплекс защиты типа КЗР-2, а защиты от витковых замыканий не устанавливаются. Такое положение обусловлено как отсутствием теории, позволяющей разрабатывать простые и чувствительные устройства, способные выделить сигнал о возникновении повреждения межвитковой изоляции, так и традиционно принятой идеологией построения релейных защит СМ, основанной на использовании в качестве датчиков трансформаторы тока и напряжения.

Современное состояние развития вычислительной техники и её элементной базы создало предпосылки для разработки более совершенных устройств автоматики и релейной защиты, которые могут, сохраняя традиционные принципы действия защит, реализовывать новые алгоритмы защитно-диагностических систем, недостижимые для устройств на элементах аналоговой техники.

В этой связи создание высокоэффективной системы технической диагностики синхронных машин, учитывающей особенности их конструкции и удовлетворяющей современным требованиям по техническим и экономическим показателям, эффективно работающих как автономно, так и в составе автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП), представляет собой актуальную научно-техническую проблему.

Объектами исследования являются теория, методы, алгоритмы и средства построения защитно-диагностических систем обнаружения витковых замыканий в обмотке ротора синхронной машины.

Целью настоящей работы является разработка научно-методологических основ, методов и алгоритмов построения систем диагностики технического состояния обмотки ротора синхронных машин для обеспечения их надежной работы в эксплуатационных режимах.

Для достижения данной цели были поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Развитие теории математического моделирования синхронных машин при наличии витковых и двойных замыканий на землю в обмотке ротора, позволяющей использовать модель синхронной машины в адаптивных методах параметрической идентификации на основе настраиваемых моделей.

2. Совершенствование методов расчета магнитных полей в торцевой зоне и магнитных потоков в торцевом щите синхронной машины при витковых замыканиях в обмотке ротора.

3. Поиск новых информационных признаков наличия/возникновения

витковых замыканий в обмотке ротора синхронной машины.

4. Разработка новых подходов и методов выявления витковых замыканий в обмотке ротора синхронной машины.

5. Разработка методологии построения интеллектуальной системы диагностики витковых замыканий в обмотке ротора синхронной машины.

6. Экспериментальное апробирование методов и алгоритмов построения системы диагностики обмотки ротора синхронной машины.

Методы исследования. В диссертационной работе применены:

1. Теория обыкновенных дифференциальных уравнений и дифференциальных уравнений в частных производных, методы составления и решения систем линейных алгебраических и трансцендентных уравнений.

2. Численные методы, включая: методы численного интегрирования, методы интерполяции функций, заданных таблично, методы линейной и нелинейной регрессии, методы решения задачи Коши для систем дифференциальных уравнений, методы решения краевых задач.

3. Теория моделирования электрических машин.

4. Положения теории цифровой обработки сигналов; интегральные преобразования, преобразования Лагерра.

5. Теории интеллектуальных систем: искусственные нейронные сети, нечеткая логика.

Проверка результатов теоретических исследований выполнялась на экспериментальных установках с использованием метода планирования эксперимента, корреляционного и многофакторного регрессионного анализа экспериментальных данных.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Предложен метод выделения диагностического признака виткового замыкания обмотки явнополюсного ротора синхронной машины на основе анализа изменений характеристик магнитного поля рассеяния в торцевой зоне, отличающийся тем, что из выпрямленного сигнала от индукционного магнитометрического датчика выделяется чувствительная к возникновению повреждения гармоническая компонента за счет специально настроенного эллиптического фильтра. Причем частота полезного сигнала соответствует крайнему локальному максимуму АЧХ в полосе пропускания, а паразитной частоте соответствует первый локальный минимум в полосе подавления, чем обеспечивается требуемая чувствительность метода при минимальном порядке эллиптического фильтра.

2. Предложен метод выявления диагностического признака виткового замыкания обмотки неявнополюсного ротора синхронной машины на основе анализа изменений характеристик магнитного поля рассеяния в торцевой зоне, отличающийся тем, что вычисляется чувствительный к возникновению повреждения интегральный коэффициент, определяемый сопоставлением семейств компонентов разложения по функциям Лагерра первого и второго полупериодов сигнала от индукционного магнитометрического датчика.

3. Предложен метод выявления диагностического признака виткового

замыкания обмотки неявнополюсного ротора синхронной машины на основе анализа изменений характеристик магнитного поля рассеяния в торцевой зоне, отличающийся тем, что вычисляется чувствительный к возникновению повреждения коэффициент, являющийся отношением интегралов от модулей невязки между сглаженным и восстановленным на основе методов адаптивной идентификации сигналами, взятыми на интервалах, соответствующих первому и второму полупериодам сигнала от индукционного магнитометрического датчика.

4. Предложен способ выявления диагностического признака виткового замыкания обмотки ротора синхронной машины на основе анализа переменных состояния электрической машины, отличающийся тем, что вычисляется чувствительный к повреждению выходной сигнал динамической нейронной сети, на вход которой подаются текущие и однократно задержанные сигналы статорных токов и напряжений в неподвижной системе координат α, β , тока и напряжения ротора, а также специального сигнала квазиреактивной мощности, которая вычисляется как векторное произведение векторов тока и напряжения статора в неподвижной системе координат α, β .

5. Развита теория математического моделирования синхронной машины с витковым замыканием в обмотке ротора, отличающаяся тем, что применено билинейное преобразование системы дифференциальных уравнений, описывающих работу машины, что позволило использовать модель синхронной машины в естественных координатах, в адаптивных методах параметрической идентификации, работающих в режиме реального времени.

6. Предложена концепция построения технической диагностики и прогнозирования состояния обмотки ротора синхронной машины, отличающаяся тем, что производится комплексное сопряжение чувствительных способов выделения диагностической информации на основе методов интеллектуальной обработки цифровых сигналов, что позволило повысить достоверность диагностирования и обеспечить селективность определения вида дефекта.

Практическая ценность работы:

1. Получены практические данные о динамике признаков диагностирования обмотки ротора позволяющие повысить безотказность эксплуатации синхронной машины в условиях воздействия внешних и внутренних факторов.

2. Разработаны новые принципы и алгоритмы построения диагностических систем обнаружения виткового замыкания в обмотке ротора, которые позволяют проектировать новые и совершенствовать существующие системы диагностики и релейной защиты синхронных машин.

3. Разработан и апробирован ряд технических решений, лежащих в основе эффективной системы диагностики синхронной машины.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается хорошим совпадением результатов расчетов и натурного эксперимента.

Положения, выносимые на защиту:

1. Модель синхронной машины с витковым замыканием в обмотке ротора, в которой применено билинейное преобразование системы дифференциальных уравнений, описывающих работу машины.

2. Метод выделения полезного диагностического сигнала о возникновении виткового замыкания в обмотке явнополюсного ротора синхронной машины из выпрямленного сигнала от индукционного магнитометрического датчика, в котором выделяется чувствительная к возникновению повреждения гармоническая компонента за счет специально настроенного эллиптического фильтра.

3. Метод выявления диагностического признака виткового замыкания в обмотке неявнополюсного ротора синхронной машины, в котором вычисляется чувствительный к возникновению повреждения интегральный коэффициент, определяемый на основе декомпозиции по функциям Лагерра сигнала от индукционного магнитометрического датчика.

4. Метод выявления диагностического признака виткового замыкания в обмотке неявнополюсного ротора синхронной машины повышенной чувствительности, основанный на математическом аппарате адаптивной идентификации сигнала от индукционного магнитометрического датчика.

5. Метод выявления диагностического признака виткового замыкания в обмотке ротора синхронной машины на основе анализа переменных состояния электрической машины.

6. Концепция построения интеллектуальной экспертной системы технической диагностики виткового замыкания в обмотке ротора синхронной машины.

Реализация результатов работы. Основные методики и разработанные устройства были внедрены: в ООО "ТК "СИСТЕМА", ООО УК «Надежда», ООО «ЯРКОМ ПЛЮС», ПАО «ГТ Плюс» (Новокуйбышевск, Тольятти), филиал АО НК «Казахстан темир жолы», а также в учебном процессе электротехнического факультета Самарского государственного технического университета. Акты об использовании и внедрении результатов диссертационной работы приведены в приложениях.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались: на республиканской научно-технической конференции «И чтения Ш. Шокина», Павлодар, 2006 г.; на заседании Ученого совета КазНИИ энергетики и связи им.Чокина, Алматы 2007 г.; на V Всероссийской научно-технической конференции, 2012. – Томск, ТПУ; на VIII mezinárodní vedecko - praktická conference: April 2012. – Prague; на XVIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: Апрель 2012. – Томск: ТПУ; на III, IV, V и VI международной научно-технической конференции «Энергетика глазами молодежи»; на международной научной конференции молодых ученых, студентов и школьников «VI и VII Сатпаевские чтения», – Павлодар. – 2008; 2009 гг.; на IV международной научно-технической конференции «Электромеханические преобразователи

энергии», – Томск. – 2009; на 13-ой международной конференции «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты», – Алушта. –2010; на IV международной научно-технической конференции "Россия молодая: передовые технологии - в промышленность", – 2013; на молодежном научном форуме: Технические и математические науки, VI Международной научно-практической конференции, – Москва: МЦНО, – 2013; на международной научно-практической конференции, – Санкт-Петербург, – 2013; на 9-а Международна научна практична конференция, 2013. – София (Болгария); на V международной молодежной научно-технической конференции, 2014. – Томск; на X mezinárodní vedecko-praktická konference, Prague, – 2014; на IV международной научной конференции «Технические науки в России и за рубежом», – Москва, – 2015; на XIV международной научно-практической конференции, – Томск, – 2014; на международной научно-технической конференции "Пром-Инжиниринг" (ICIE–2016); на XI и XII International IEEE Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2015, SIBCON-2016).

Публикации. Содержание диссертации нашло отражение в 90 работах, в том числе 34 статьях в журналах, рекомендованных ВАК РФ, из которых 8 – в базе цитирования Scopus, 26 патентах на изобретения, 10 – в зарубежных изданиях, не входящих в перечень ВАК РФ, 19 докладах на международных конференциях и 1 монографии.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести разделов и заключения, изложенных на 239 страницах машинописного текста. Содержит 83 рисунка, 11 таблиц, список использованных источников из 253 наименований и 4 приложения на 54 страницах, содержащие материалы, относящиеся к практической реализации.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы актуальность и цель работы. Отражена ее научная новизна и практическая ценность. Указаны методы исследований и положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая ценность работы.

В первой главе приведен анализ повреждаемости обмоток роторов синхронных машин и на основании опубликованных статистических данных показано, что удельная повреждаемость некоторых типов синхронных генераторов по вине виткового замыкания обмотки ротора достигает величины $40 \cdot 10^{-2}$ год⁻¹. Для предотвращения значительного экономического ущерба от возможного отказа генераторов вследствие их эксплуатации при неустранении повреждений в обмотке ротора необходима разработка теории построения систем функциональной диагностики. Показано, что конструктивное и схмотехническое исполнение синхронной машины затрудняет выявление однозначно трактуемых признаков витковых замыканий в обмотке ротора на основе известных принципов построения устройств релейной защиты и диагностики электрооборудования.

В главе проанализированы научные проблемы выявления виткового замыкания в обмотке ротора, задачи и методы построения технической диагностики. Выявлено, что в настоящее время методология построения средств диагностики и устройств защиты обмотки ротора синхронных машин не позволяет создавать эффективные защитно-диагностические устройства выявления повреждений с требуемыми свойствами по селективности, надежности и быстродействию. Сделан вывод о необходимости разработки принципиально новых подходов к созданию технических устройств диагностики СМ.

Вторая глава посвящена постановке задачи и решению теоретических вопросов по моделированию токов в обмотках и магнитных полях в торцевой зоне синхронной машины с витковым замыканием в обмотке ротора. Предлагается для разрешения системы дифференциальных уравнений, описывающих работу синхронной машины, приведение уравнений к алгебраической форме на основе билинейного преобразования.

Рассмотрена математическая модель СМ без демпферных обмоток и без уравнения моментов, с учетом виткового замыкания в обмотке ротора, которая описывается следующими дифференциальными уравнениями равновесия:

$$\begin{cases} -U_A = i_A R_A + \frac{d\Psi_A}{dt}; \\ -U_B = i_B R_B + \frac{d\Psi_B}{dt}; \\ -U_C = i_C R_C + \frac{d\Psi_C}{dt}; \\ U_f = i_f R_f + \frac{d\Psi_f}{dt}; \\ 0 = i_{kd} R_{kd} + \frac{d\Psi_{kd}}{dt}. \end{cases}$$

где $U_A, U_B, U_C, \Psi_A, \Psi_B, \Psi_C$ и i_A, i_B, i_C – мгновенные значения напряжений, потокосцеплений и токов фаз A, B, C статора; U_f, Ψ_f и i_f – напряжение, потокосцепление и ток обмотки возбуждения приведенного ротора; Ψ_{kd} и i_{kd} – потокосцепление и ток приведенного продольного замкнутого контура ротора; R_A, R_B, R_C – активные сопротивления фаз A, B, C статора; R_f – активное сопротивление приведенной обмотки возбуждения; R_{kd} – активное сопротивление приведенного замкнутого контура.

Разрешение системы дифференциальных уравнений приведенных выше возможно лишь численными методами. Основным фактором, позволяющим получать асимптотически устойчивое решение системы дифференциальных уравнений, является правильный выбор шага интегрирования, который зависит от постоянных времени изучаемого объекта. Преобразуем систему дифференциальных уравнений, описывающую динамическое состояние синхронной машины с замыканием в обмотке ротора рис. 1., с переходом из

пространства оригиналов в пространство изображений на основе преобразования Лапласа:

$$\begin{cases} s \cdot \Psi_A(s) = -R_A \cdot i_A(s) - U_A(s); \\ s \cdot \Psi_B(s) = -R_B \cdot i_B(s) - U_B(s); \\ s \cdot \Psi_C(s) = -R_C \cdot i_C(s) - U_C(s); \\ s \cdot \Psi_f(s) = -R_f \cdot i_f(s) - U_f(s); \\ s \cdot \Psi_{kd}(s) = -R_{kd} \cdot i_{kd}(s). \end{cases}$$

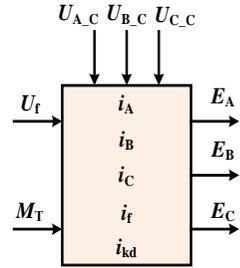


Рис. 1. Синхронная машина в пространстве состояний

Билинейное преобразование связано с оператором Лапласа следующим соотношением, для перехода к линейным алгебраическим уравнениям необходимо разложить z в ряд Тейлора:

$$s = \frac{1}{T} \ln(z) = \frac{2}{T} \left[\frac{z-1}{z+1} + \frac{1}{3} \left(\frac{z-1}{z+1} \right)^3 + \frac{1}{5} \left(\frac{z-1}{z+1} \right)^5 \right] \approx \frac{2}{T} \frac{z-1}{z+1} = \frac{2}{T} \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}$$

С учетом $s \approx \frac{2}{T} \cdot \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}$ переходим к z -изображениям дискретных переменных состояния СМ:

$$\begin{cases} \Psi_A(z) \frac{2}{T} \cdot \frac{(1-z^{-1})}{1+z^{-1}} = -R_A \cdot i_A(z) - U_A(z); \\ \Psi_B(z) \frac{2}{T} \cdot \frac{(1-z^{-1})}{1+z^{-1}} = -R_B \cdot i_B(z) - U_B(z); \\ \Psi_C(z) \frac{2}{T} \cdot \frac{(1-z^{-1})}{1+z^{-1}} = -R_C \cdot i_C(z) - U_C(z); \\ \Psi_f(z) \frac{2}{T} \cdot \frac{(1-z^{-1})}{1+z^{-1}} = -R_f \cdot i_f(z) - U_f(z); \\ \Psi_{kd}(z) \frac{2}{T} \cdot \frac{(1-z^{-1})}{1+z^{-1}} = -R_{kd} \cdot i_{kd}(z). \end{cases}$$

Далее переходим от изображений дискретных переменных состояния к оригиналам, то есть к конечным последовательностям, и подставляя в них систему линейных алгебраических уравнений потокосцеплений, с задержками на один такт. После ряда преобразований получаем дискретную модель синхронной машины (1). На рис. 2 приведена структурная схема дискретной модели СМ в матричном виде (2).

$$\begin{aligned}
U_A(k) &= \left(-R_A - \frac{2L_A}{T}\right) \cdot i_A(k) - \frac{2M_{AB}}{T} \cdot i_B(k) - \frac{2M_{AC}}{T} \cdot i_C(k) - \frac{2M_{Af}}{T} \cdot i_f(k) - \\
&- \frac{2M_{Akd}}{T} i_{kd}(k) + \left(-R_A + \frac{2L_A}{T}\right) i_A(k-1) + \frac{2M_{AB}}{T} i_B(k-1) + \frac{2M_{AC}}{T} i_C(k-1) \\
&+ \frac{2M_{Af}}{T} i_f(k-1) + \frac{2M_{Akd}}{T} i_{kd}(k-1) - U_A(k-1) \\
U_B(k) &= -\frac{2M_{BA}}{T} i_A(k) + \left(-R_B - \frac{2L_B}{T}\right) i_B(k) - \frac{2M_{BC}}{T} i_C(k) - \frac{2M_{Bf}}{T} i_f(k) - \\
&- \frac{2M_{Bkd}}{T} i_{kd}(k) + \frac{2M_{BA}}{T} i_A(k) + \left(-R_B + \frac{2L_B}{T}\right) i_B(k-1) + \frac{2M_{BC}}{T} i_C(k-1) + \\
&\frac{2M_{Bf}}{T} i_f(k-1) + \frac{2M_{Bkd}}{T} i_{kd}(k-1) - U_B(k-1) \\
U_C(k) &= -\frac{2M_{CA}}{T} i_A(k) - \frac{2M_{CB}}{T} i_B(k) + \left(-R_C - \frac{2L_C}{T}\right) i_C(k) - \frac{2M_{Cf}}{T} i_f(k) - \\
&- \frac{2M_{Ckd}}{T} i_{kd}(k) + \frac{2M_{CA}}{T} i_A(k-1) + \frac{2M_{CB}}{T} i_B(k-1) + \left(-R_C + \frac{2L_C}{T}\right) i_C(k-1) + \\
&+ \frac{2M_{Cf}}{T} i_f(k-1) + \frac{2M_{Ckd}}{T} i_{kd}(k-1) - U_C(k-1) \\
U_f(k) &= -\frac{2M_{fA}}{T} i_A(k) - \frac{2M_{fB}}{T} i_B(k) - \frac{2M_{fC}}{T} i_C(k) + \left(-R_f - \frac{2L_f}{T}\right) i_f(k) - \\
&- \frac{2M_{fkd}}{T} i_{kd}(k) + \frac{2M_{fA}}{T} i_A(k-1) + \frac{2M_{fB}}{T} i_B(k-1) + \frac{2M_{fC}}{T} i_C(k-1) + \\
&+ \left(-R_f + \frac{2L_f}{T}\right) i_f(k-1) + \frac{2M_{fkd}}{T} i_{kd}(k-1) - U_f(k-1) \\
0 &= -\frac{2M_{kdA}}{T} i_A(k) - \frac{2M_{kdB}}{T} i_B(k) - \frac{2M_{kdC}}{T} i_C(k) + \frac{2M_{kdf}}{T} i_f(k) + \\
&+ \left(-R_{kd} - \frac{2L_{kd}}{T}\right) i_{kd}(k) + \frac{2M_{kdA}}{T} i_A(k-1) + \frac{2M_{kdB}}{T} i_B(k-1) + \frac{2M_{kdC}}{T} i_C(k-1) + \\
&+ \frac{2M_{kdf}}{T} i_f(k-1) + \left(-R_{kd} + \frac{2L_{kd}}{T \cdot R_{kd}}\right) i_{kd}(k-1)
\end{aligned} \tag{1}$$

$$\mathbf{i}(k) = \mathbf{A}^{-1}(k) \cdot \mathbf{B}(k-1) \cdot \mathbf{i}(k-1) + \mathbf{A}^{-1}(k) \cdot (\mathbf{U}(k-1) + \mathbf{U}(k)). \tag{2}$$

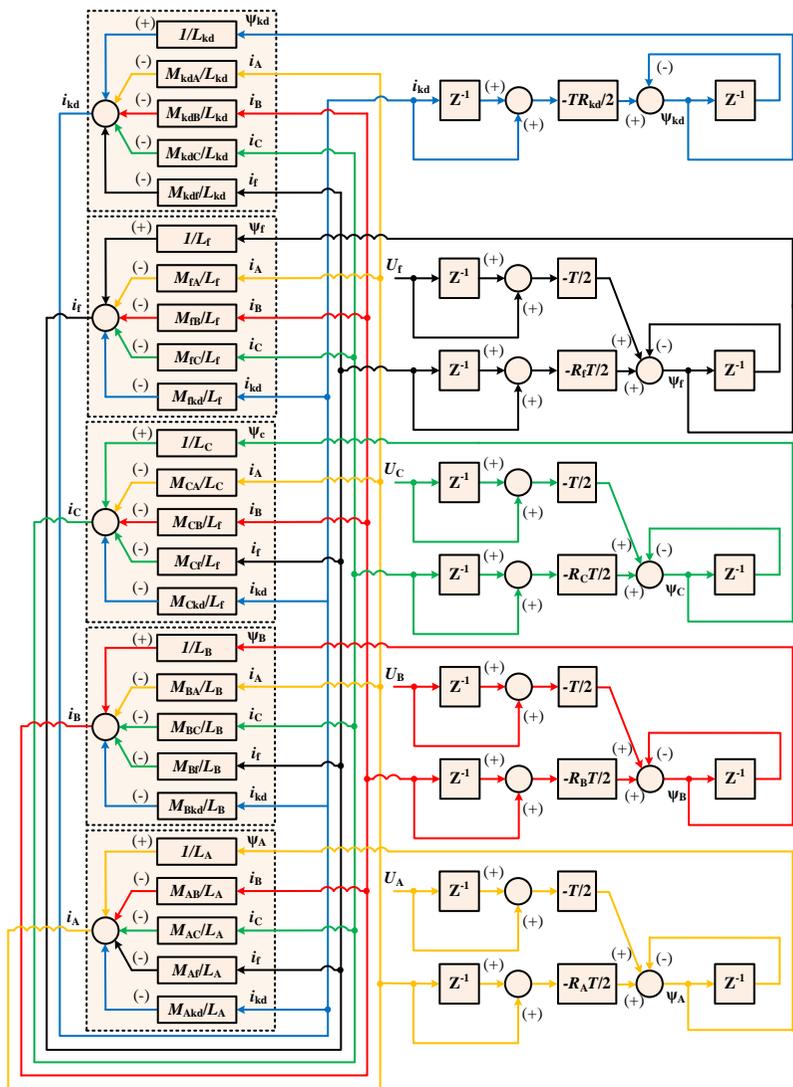


Рис.2. Структурная схема дискретной модели синхронной машины

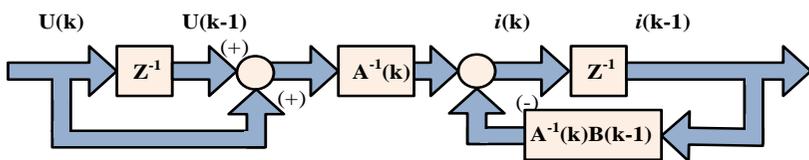


Рис. 3. Иллюстрация структурной схемы модели СМ в матричном виде

Экспериментально доказана адекватность работы модели. Абсолютная погрешность расчета токов в аварийных режимах находилась на уровне 5 %.

В третьей главе были разработаны методы определения ВЗ в роторе для явнополюсных машин на основе дифференциального принципа измерения с двух датчиков магнитного поля (ДМП) рассеяния и выделения субгармонической из однополярного сигнала одного датчика, установленных в торцевой зоне. Обоснована зависимость между степенью несимметрии магнитного поля, вызванного витковым замыканием, и величиной полезного сигнала на выходе ДМП. Разработано устройство, выделяющее величину несимметрии магнитного поля.

Способ выделения субгармонической из однополярного сигнала одного датчика основан на анализе ЭДС на выходе ДМП. Как видно из рис. 4, при 4 % ВЗ в обмотке явнополюсного ротора синхронного генератора ГАБ-4-Т/230 в выпрямленном сигнале ЭДС помимо постоянной и 100 Гц составляющей появляется огибающая с частотой, равной частоте вращения машины ($f_v = f_1 / p$, где f_1 – частота сети). Если $f_v = f_1 / p$ превысит установленную величину, то это воспринимают как сигнал о наличии ВЗ.

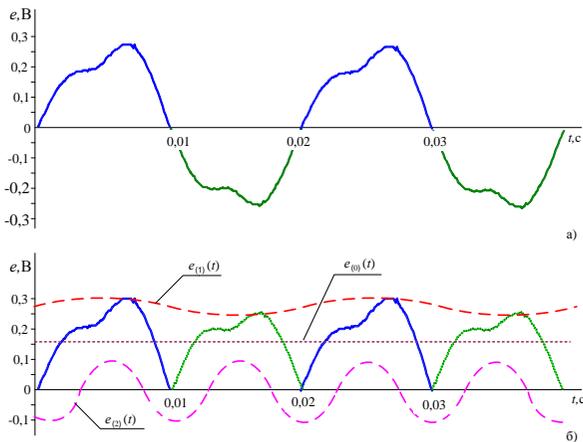


Рис. 4. Осциллограмма ЭДС на выходе ДМП в ГАБ-4-Т/230 с $p=1$ в режиме, близком к холостому ходу

Амплитуда гармонической с частотой f_v зависит от числа пар полюсов. Зависимость этой гармонической от амплитуды с $p = 1$ приближенно можно оценить выражением:

$$e_v(p) = \frac{e_v(p=1)}{p}.$$

Для реализации способа было спроектировано устройство, структурная схема которого приведена на рис. 5, где: ДМП – датчик магнитного поля; В1, В2 – выпрямители; ФВЧ – фильтр высоких частот для подавления постоянной составляющей; ФНЧ1 – фильтр низких частот для выделения периодической

составляющей частотой f_v ; ФНЧ2 – фильтр низких частот для формирования величины входного сигнала; ФНЧ3 – фильтр низких частот, формирующий опорное напряжение (уставку); ТШ – неинвертирующий триггер Шмитта.

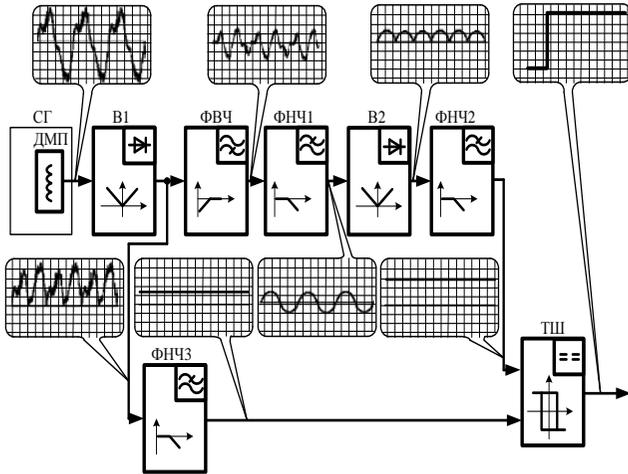


Рис. 5. Структурная схема устройства.

В качестве опорного напряжения выступает постоянная составляющая после В1, поскольку она пропорциональна сигналу с ДМП. Изменением коэффициента усиления на ФНЧ3 можно задавать величину уставки срабатывания ТШ.

Для эффективной работы устройства разработан эллиптический фильтр минимального порядка, обеспечивающий качественное выделение полезного сигнала и подавление частоты $2f_v$. Для этого была разработана методика расчета параметров эллиптического фильтра с учетом локальных неоднородностей амплитудно-частотной характеристики (рис. 6), позволяющая минимизировать потери полезной компоненты сигнала.

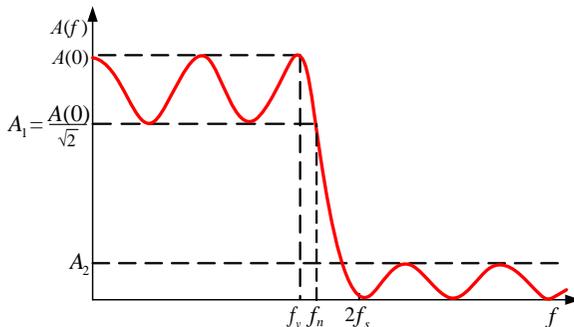


Рис. 6. АЧХ эллиптического ФНЧ

Настройку фильтра предлагается производить таким образом, чтобы максимальный коэффициент передачи соответствовал частоте f_v (см. рис. 6). Также для настройки фильтра учтена еще одна его особенность – в полосе подавления имеются точки минимума. Поэтому вторым критерием настройки фильтра предлагается настройка на минимальный коэффициент усиления в полосе подавления частоты $2f_s$ (см. рис. 6).

Для настройки устройства рис. 5 был смоделирован тестовый сигнал. Чувствительность на тестовом сигнале составила 2 % несимметрии от общего уровня сигнала. На экспериментальной установке устройство надежно реагировало на замыкании 2,5 % витков полюса.

В четвертой главе решается задача выделения диагностической информации из сигнала на выходе датчика магнитного поля на основе цифровых методов обработки информации. Сформулированы требования к контроллерам на цифровых сигнальных процессорах. Проанализирована проблема выделения полезной составляющей из нестационарного сигнала на выходе ДМП в условии непараметрической априорной неопределенности и ограниченном объеме измерений. Показано, что сигнал на выходе ДМП при ВЗ в обмотке ротора СМ представляет собой аддитивную смесь из составляющих индукции от токов статорной обмотки, токов роторной обмотки, аддитивных шумовых составляющих, индукции от воздушного зазора, ошибки измерения и функции полезного сигнала от возникновения виткового замыкания в обмотке ротора.

В главе приводятся два метода выделения полезной диагностической информации о возникновении виткового замыкания в обмотке ротора СМ из сигнала на выходе ДМП. Первый метод базируется на решении задач обработки сигналов адаптивными системами идентификации, в основе которых использованы интегрированные системы моделей с переменными параметрами с учетом дополнительной априорной информации вида:

$$\begin{cases} y_t^* = y_t + \xi_t = f_0(t, \mathbf{a}(t)) + \xi_t, \\ \bar{\mathbf{z}}_{t+\tau} = \mathbf{f}_a(t + \tau, \mathbf{a}(t)) + \boldsymbol{\eta}_t, \tau \geq 0, \end{cases} \quad (3)$$

где параметры $\mathbf{a}(t) = (\alpha_j(t), j = \overline{1, m})$ – неизвестные ограниченные, однозначные функции времени t ; $\mathbf{f}_a(t + \tau, \mathbf{a}) = (f_{a,j}(t + \tau, \mathbf{a}(t)), j = \overline{1, p})$ – модели объектов аналогов, позволяющих учитывать дополнительную априорную информацию $\bar{\mathbf{z}}_t = (\bar{z}_{t,j}, j = \overline{1, p})$, известную к моменту времени t . Модели исследуемого процесса и модели объектов аналогов $f_0, f_{a,j}$ – известные функции (функционалы); $\xi_t, \boldsymbol{\eta}_t = (\eta_{t,j}, j = \overline{1, p})$ – случайные процессы, представляющие погрешности измерений сигнала; y_t^* , ошибки дополнительных данных и экспертных оценок $\bar{\mathbf{z}}_t$.

Процедуру определения параметров $\mathbf{a}(t)$ модели (1), можно представить моделью $f_0(t, \mathbf{a}(\tilde{t}))$ с постоянными параметрами $\mathbf{a}(\tilde{t})$ в окрестности некоторой точки $\tilde{t} \in [t_1, t_n]$. Параметры $\mathbf{a}(\tilde{t}) = \tilde{\mathbf{a}}$ могут быть определены с

использованием данных $y_i^*, i \in \overline{1, n}$, обучающего интервала $(\tilde{t} - u) \in [t_1, t_n]$, сформированного с помощью весовой функции $w((\tilde{t} - u)/h)$ с параметром h .

Процесс идентификации осуществляется в виде решения двух оптимизационных задач:

$$\mathbf{a}_n^*(\tilde{t}, \boldsymbol{\beta}) = \arg \min_{\mathbf{a}} \Phi_n(\tilde{t}, \tilde{\mathbf{a}}, \boldsymbol{\beta}), \quad (4)$$

$$\boldsymbol{\beta}_n^* = \arg \min_{\boldsymbol{\beta}} J_{0,n}(\mathbf{a}_n^*(\tilde{t}, \boldsymbol{\beta})), \quad (5)$$

где запись $\arg \min_x f(x)$ означает точку минимума x^* функции $f(x)$ ($f(x^*) = \min_x f(x)$); $\Phi_n(\tilde{t}, \tilde{\mathbf{a}}, \boldsymbol{\beta}) = J_{0,n}(\tilde{t}, h, \tilde{\mathbf{a}}) + J_a(\tilde{\mathbf{a}}, \mathbf{r})$ – комбинированный показатель качества модели сигнала и моделей объектов аналогов:

$$J_{0,n}(\tilde{t}, h, \tilde{\mathbf{a}}) = \sum_{i=1}^n K_n((\tilde{t} - t_i)/h_n) \psi_0(y_i^* - f(t_i, \tilde{\mathbf{a}}),$$

$$J_a(\tilde{\mathbf{a}}, \mathbf{r}) = \sum_{j=1}^p r_j \psi_{a,j}(\bar{z}_j(\tilde{t} + \tau) - f_{a,j}(\tilde{t} + \tau, \tilde{\mathbf{a}})),$$

где $\mathbf{r} = (r_j, j = \overline{1, p})$ – вектор управляющих параметров, определяющих значимость (вес) дополнительных априорных данных $\bar{z}_{n,j}$; $\boldsymbol{\beta} = (\mathbf{r}, h)$ – объединенный вектор; $\psi_0, \psi_{a,j}$ – известные функции;

Анализ данных, полученных с датчика магнитного поля, показывает, что при возникновении виткового замыкания наблюдаются локальные изменения сигнала $y^*(t_i)$.

В качестве диагностического критерия предлагается использовать коэффициент ε , представляющий собой отношение интегральных показателей положительной и отрицательной полуволны, характеризующих меру отклонения сглаженного сигнала $\hat{y}(t)$ от восстановленного $\tilde{y}(t)$:

$$J = \frac{\int_{t_1}^{t_{100}} |\hat{y}(t) - \tilde{y}(t)| dt}{\int_{t_{100}}^{t_{200}} |\hat{y}(t) - \tilde{y}(t)| dt} \leq \varepsilon \quad (6)$$

где t_1, t_{100}, t_{200} – временные границы локальной области изменения сигнала.

В процентах критерий (6) выражается как $J^* = |1 - J| \cdot 100\%$. Из (6) видно, что проблема диагностики ВЗ СМ заключается в комплексном решении задач сглаживания для получения оценки $\hat{y}(t)$, определения моментов времени локальных изменения сигнала и его восстановлению для получения оценки $\tilde{y}(t)$.

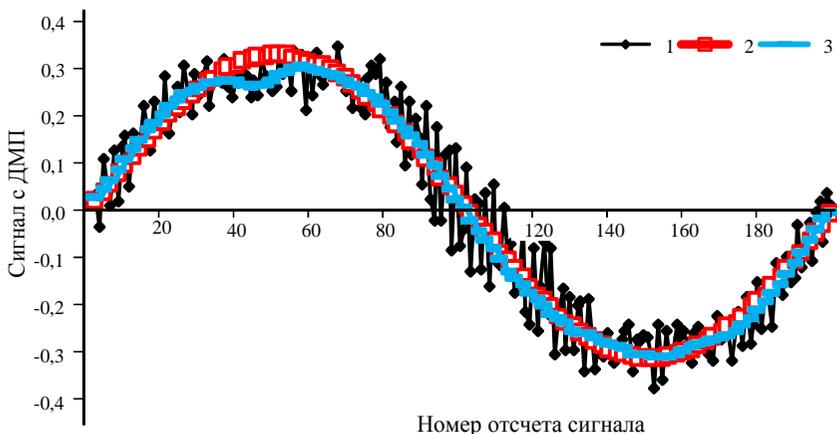


Рис.7. Сигнал на выходе ДМП с ВЗ 3 % витков при работе СМ в режиме холостого хода 1 – исходный сигнал, 2 – восстановленный сигнал, 3 – сглаженный сигнал.

На рис. 7 линией 3 изображены сглаженные значения сигнала $\hat{y}(t)$, полученные с использованием оценок и весовой функции $K((x/h) = \exp(-x^2/h)$. Оценки параметра сглаживания $h_{n(k)}^*$ определялись периодически в моменты времени $t_{n(k)}$, при $n(k) = 5, 10, 15, \dots$ путем решения оптимизационной задачи (3) методом золотого сечения с использованием процедуры «скользящий контроль». Линией 2 изображены восстановленные значения сигнала с ДМП, полученные при использовании модели:

$$\begin{cases} y_i^* = \alpha_1(t) + \alpha_2(t)\sin(\alpha_3 \cdot t) + \xi_i, \\ \bar{\alpha}_2 = \alpha_2(t) + \eta_i, \end{cases} \quad (7)$$

и алгоритма по методу Гаусса–Ньютона $K_n(h_n) = \mathbf{I}$, $W(\mathbf{r}_n) = r \cdot \mathbf{I}$, $\bar{\alpha}_2 = 0,3$ по всей реализации сигнала, $y_n^*(t_i), i = \overline{1, 201}$, приведенной на рис. 7.

Экспериментальная проверка чувствительности метода проводилась при замыкании 4-х витков полюса (1,25 %), 10 витков полюса (4 %) и 43 витков полюса (17,2 %) лабораторного синхронного генератора ГАБ-4-Т/230. Результаты экспериментов сведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты диагностики ВЗ в обмотке ротора СМ

Состояние обмотки ротора	Значения критерия диагностики ВЗ в %	
	без нагрузки	под нагрузкой
Без повреждения	1,3	1,36
4 (1,2 %) витка	3,7	3,8
10 (4 %) витков	6,8	7,2
43 (17,2 %) витка	13,5	

Вторым методом выделения диагностической информации с ДМП предлагается использовать декомпозицию оцифрованного сигнала по функциям Лагерра, поскольку, по мнению автора, данный метод является наиболее подходящим для анализа сигнала конечной длины, что и представляют собой исследуемые полупериоды (рис. 8) (сигналы, подлежащие декомпозиции выделены красным и синим цветом). Первоначально сигнал за время одного периода разделяется на положительную и отрицательную составляющие.

Как видно из рис. 8,б, полезной информацией о наличии дефекта являются локальные изменения в одном из полупериодов, которые на рисунках отмечены пунктирной линией.

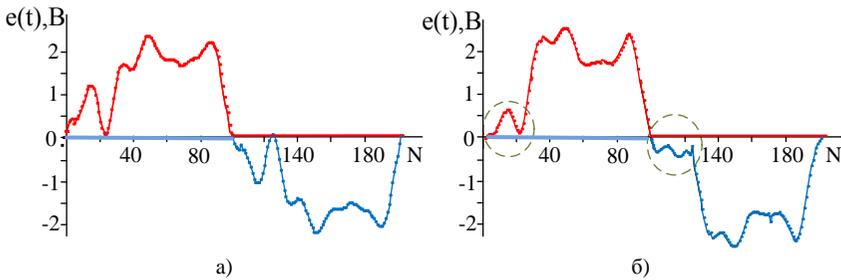


Рис. 8. Осциллограмма ЭДС на выходе ДМП при нагрузке
а – сигнал неповрежденной машины, б – сигнал с наличием ВЗ в обмотке ротора

Разложение положительных и отрицательных частей сигнала по системе функций Лагерра записывается в виде ряда:

$$x(t) = \sum_{n=0}^{\infty} c_n l_n(t),$$

где $c_n = \int_0^{\infty} e(t) l_n(t) dt$ – значения коэффициентов ряда; $l_n(t)$ – функции Лагерра.

Функция Лагерра образуется при помощи полиномов, которые рассчитываются по формуле:

$$l_n(\tau) = \frac{e^{\tau}}{n!} \cdot \frac{d^n}{d\tau^n} (\tau^n e^{-\tau}).$$

Сами функции Лагерра рассчитывались по формуле:

$$l_n(t) = \sqrt{2\alpha} \cdot \exp(-\alpha t) \cdot \sum_{j=0}^n (-1)^j \cdot \frac{C_n^j}{j!} \cdot (2\alpha t)^j,$$

где, α – масштабный коэффициент, C_n^j – число сочетаний из n по j .

Значение α выбирается таким образом, чтобы длительность исследуемого сигнала (длительность одного периода) и функции Лагерра приближенно были равны.

На основе расчетов десяти функций Лагерра построена спектральная диаграмма коэффициентов обеих полуволин (рис. 9).

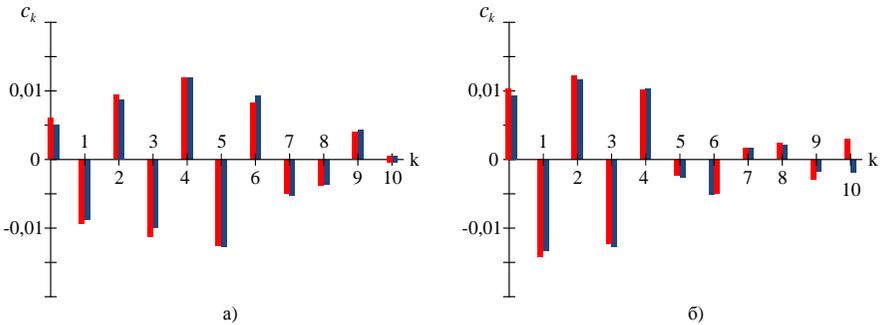


Рис. 9. Спектральные диаграммы для положительной и отрицательной полуволин
 а – без виткового замыкания, б – с витковым замыканием,
 ■ – коэффициент отрицательной полуволин; ■ – коэффициент положительной полуволин

Как видно из рис. 9, наблюдается сильное различие 8-го, 9-го и в особенности 10-го коэффициента при наличии виткового замыкания (рис. 9,б). В качестве критерия наличия замыкания в обмотке ротора СМ предлагается ввести интегральный коэффициент несимметрии δ , определяемый в процентах как:

$$\delta = \frac{\sum_{k=0}^K |c1_k - c2_k|}{\sum_{k=0}^K |c1_k|} \cdot 100\% ,$$

где $c1_k$ и $c2_k$ – коэффициенты ряда для положительной и отрицательной полуволин, K – количество коэффициентов ряда.

Результаты экспериментальной проверки: при замыкании 4 % витков $\delta = 6,625\%$, а без повреждения $\delta = 1,33\%$. Причем такое соотношение в % с незначительными отклонениями наблюдалось при нагрузке генератора от 25 % до 100 % нагрузки и при изменениях тока возбуждения (изменении выдаваемой реактивной мощности). При замыкании 10,5 % витков обмотки возбуждения δ возросло до 17,2 %, и, следовательно, данный критерий принципиально может служить признаком возникновения виткового замыкания в обмотке возбуждения синхронной машины.

В пятой главе изложен материал по разработке метода выявления диагностического признака виткового замыкания в обмотке ротора синхронной машины на основе анализа переменных состояния машины, поскольку у каждой СМ существует строгая зависимость через магнитодвижущую силу ($F=I_f^*w_f$) между током возбуждения и реактивной мощностью машины Q (регулирующая характеристика). Метод базируется на

теории идентификации сложных динамических объектов с настраиваемыми моделями (рис 10).

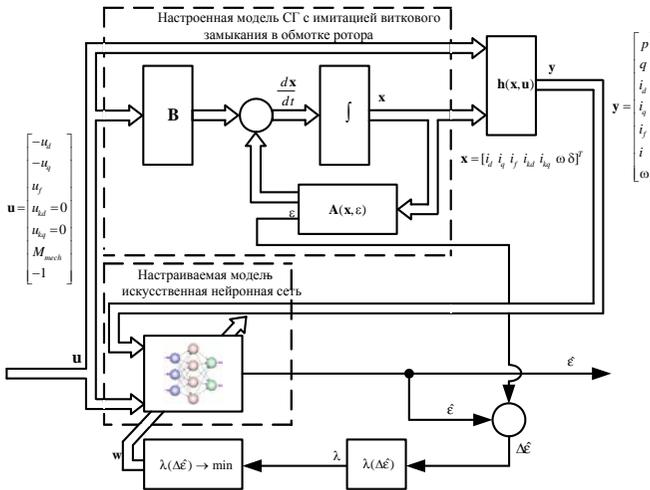


Рис. 10 Структурная схема метода диагностики ВЗ в обмотке ротора СГ на основе настраиваемой модели

В главе обоснован выбор использования в качестве настраиваемой модели динамической искусственной нейронной сети (ДНС) (см. рис. 10). Объектом наблюдения при обучении нейрорегулятора выступает дискретная математическая модель СМ с витковым замыканием в обмотке ротора, предложенная автором и подробно рассмотренная во второй главе данной работы. Определена структура ДНС с двумя скрытыми слоями, при этом в первом скрытом слое содержится 35 нейронов, во втором слое 25 нейронов. В качестве функции активации нейронов скрытых слоев выбрана функция гиперболического тангенса $th(x)$. В представленной конфигурации сигнал невязки $\Delta \hat{\varepsilon}$ формируется как разница между заданным значением доли замкнутых витков ε и её оценкой $\hat{\varepsilon}$, вычисляемой нейрорегулятором. Целевая функция ошибки обучения ДНС $\lambda(\Delta \hat{\varepsilon})$ (рис. 10) подвергается минимизации $\lambda(\Delta \hat{\varepsilon}) \rightarrow \min$ с помощью одного из методов глобальной оптимизации и находится оптимальный вектор w весов нейросети в результате проведения процедуры обучения.

Для обеспечения работоспособности динамической нейронной сети достаточно на входной слой нейросети подать мгновенные значения сигналов проекций векторов тока и напряжения статора в двухфазной неподвижной системе координат, напряжения и тока обмотки ротора, сигнал квазиреактивной мощности, а также задержки всех перечисленных сигналов.

Автором была принята глубина задержки входных сигналов $\Delta t_{\text{задер}} = 500$ мкс.

При обучении зависимости между входными и выходными данными, определяют мгновенную величину оценки процента \hat{p}_t замкнутых витков обмотки ротора синхронного генератора по формуле:

$$\hat{p}_t = \sum_{k=1}^N \left(th \left(\sum_{j=1}^m th \left(\sum_{i=1}^n (x_i \cdot w_{1ji} + w_{1j0}) \right) \cdot w_{2ji} + w_{2j0} \right) \cdot w_{3k} + w_{30} \right), \quad (10)$$

где $N = 25$ – количество нейронов в втором скрытом слое, $m = 35$ – количество нейронов в первом скрытом слое, $n = 14$ – количество нейронов во входном слое, w_{1ji} – синаптический вес i -го входа j -го нейрона первого скрытого слоя, w_{1j0} – сдвиг j -го нейрона первого скрытого слоя, w_{2ji} – синаптический вес i -го входа j -го нейрона второго скрытого слоя, w_{2j0} – сдвиг j -го нейрона второго скрытого слоя, w_{3k} – синаптический вес k -го входа нейрона выходного слоя, w_{30} – сдвиг нейрона выходного слоя, x_i – входные сигналы искусственной нейронной сети.

На основании вышеприведенных сведений автором реализована блочно-модульная структура устройства диагностики ВЗ в обмотке ротора СГ (рис. 11). Принципиальная возможность определения работы устройства проверялась на экспериментальной установке.

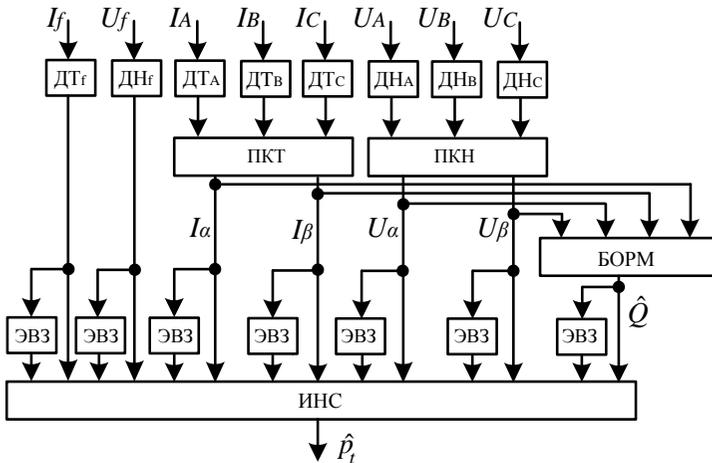


Рис. 11. Блочно-модульная структура устройства диагностики ВЗ в обмотке ротора СМ ДТ_f, ДН_f – датчики тока и напряжения возбуждения; ДТ_A, ДТ_B, ДТ_C, ДН_A, ДН_B, ДН_C – датчики токов и напряжений фаз статора; ПКТ, ПKN – преобразователи координат тока и напряжения статора; БОРМ – блок определения реактивной мощности; ЭВЗ – элемент временной задержки; ИНС – искусственная нейронная сеть

Перед началом работы обучили искусственную нейронную сеть на выборке, сформированной по опытным данным работы синхронного генератора типа ГАБ-4-Т/230 при различных значениях процента замыкания

витков в обмотке ротора. Период дискретизации – 0,5 мс. Для обучения искусственной нейронной сети использовали алгоритм Ливенберга-Марквардта. Была проведена проверка правильности определения оценки процента замкнутых витков в обмотке ротора синхронного генератора типа ГАБ-4-Т/230, для чего применялась тестирующая выборка, данные, которые не входили в обучающее множество. Обучение нейросети проводилось при следующих значениях доли замкнутых витков в обмотке ротора СГ: $w_{кз}=0$ %, $w_{кз}=3,66$ %, $w_{кз}=7,2$ %, $w_{кз}=14,8$ %. При указанных значениях удалось успешно обучить ДНС.

Для проверки эффекта переобучения, возникновение которого может служить препятствием для применения данного вида диагностики на практике, была проверена работоспособность нейросети с помощью данных, отсутствующих в тренировочном наборе, которые снимались при $w_{кз}=12$ %. Как показала проверка (таблица 2), нейросеть оказалась работоспособной и негативный эффект переобучения отсутствует.

Таблица 2. Результаты экспериментальной проверки на СМ ГАБ-4-Т/230

Активная мощность, Вт	Реактивная мощность, ВА	Ток возбуждения, А	Количество замкнутых витков, шт (%)	Количество замкнутых витков, шт(%)	Процент ошибки, %
1615	785	6,1	9 (3,6)	10 (4)	0,4
1604	640	6,45	18 (7,2)	20,5 (7,6)	1
1605	537	7	37 (14,8)	39 (15,6)	0,8

Шестая глава посвящена разработке концепции построения интеллектуальной системы диагностики виткового замыкания в обмотке ротора синхронной машины, разработана архитектура интеллектуальной системы диагностики.

В силу слабой формализации математического описания процессов в диагностируемом объекте задачу одновременной обработки диагностических сигналов, описывающих уровень вибрации, уровень магнитной несимметрии машины и уровень отклонения регулировочной характеристики СМ следует, по мнению автора, решать средствами, принятыми в теории и практике систем искусственного интеллекта.

Сложные дефекты, возникающие в СМ, как правило, одновременно влияют на несколько диагностических признаков, полученных косвенными методами измерения. При этом влияние дефекта на каждый из диагностических признаков может варьироваться от очень сильного до полного отсутствия какого-либо влияния. На основании совокупности признаков и учета степени влияния дефекта на каждый признак необходимо сделать логическое заключение. Такое заключение базируется на использовании математического аппарата нечеткой логики.

Предложена функциональная схема интеллектуальной системы диагностики СМ для решения задач по определению вида дефекта, степени и прогнозу его развития. Селективность выделения признака дефекта основана на

анализе трех видов диагностических сигналов, полученных независимо друг от друга техническими средствами диагностики. Анализируются диагностические сигналы, определяющие уровень отклонения вибрации, уровень магнитной несимметрии машины и уровень отклонения регулировочной характеристики СМ. Степень влияния на несколько диагностических признаков в системе диагностики, основанной на использовании нечеткой логики, оценивается с помощью лингвистических значений истинности. Для описания наличия несимметрии магнитного поля X_v была введена переменная «Магнитная несимметрия», для описания наличия вибрации X_f «Вибрация», для описания уровня отклонения регулировочной характеристики СМ X_p «Отклонение регулировочной характеристики».

Работа интеллектуальной системы диагностики технического состояния ротора СМ на основе нечеткой логики делится на два этапа (рис. 12):

- 1) фаззификация – преобразование входных абсолютных значений в лингвистические;
- 2) логическое заключение с использованием предварительно составленной базы знаний.

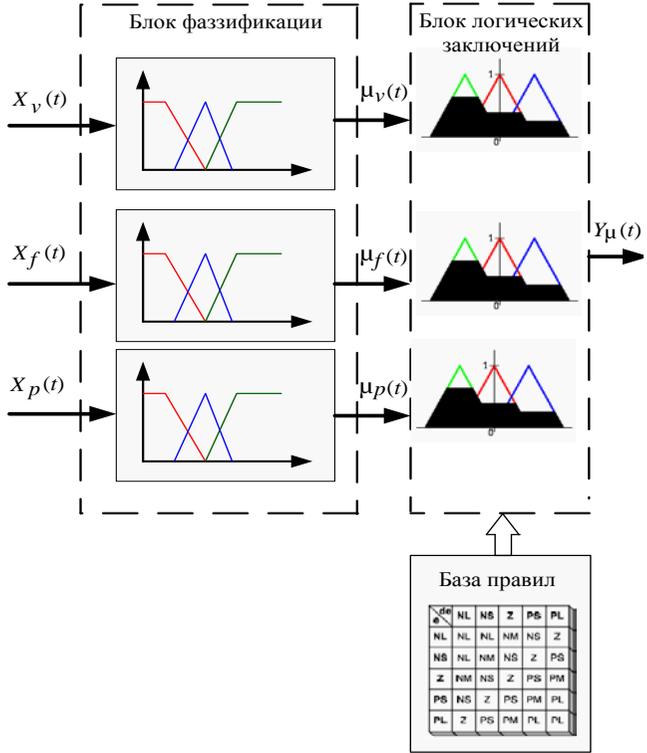


Рис. 12. Система диагностики технического состояния обмотки ротора СМ на основе нечеткой логики

Фаззификация: На этапе фаззификация сформированы входные термы на основе базы знаний и чувствительности к дефекту диагностических признаков. Были определены ключевые значения для терм «Отклонение регулировочной характеристики», «Вибрация» и «Магнитная несимметрия».

Основой для проведения операции нечеткого логического вывода является база правил, содержащая нечеткие высказывания в форме "Если-то" и функции принадлежности для соответствующих лингвистических термов. Разработанная база правил для системы диагностики ВЗ в обмотке ротора СМ содержит 75 правил. На основании базы правил – вычисляется значение истинности для предпосылки каждого правила конкретных нечетких операций, соответствующих конъюнкции или дизъюнкции термов в левой части правил. Используя один из способов построения нечёткой импликации, получим нечеткую переменную, соответствующую вычисленному значению функции принадлежности в левой части правила и нечеткому множеству в правой части правила.

В качестве вывода используется минимизация. При минимизирующем логическом выводе выходная функция принадлежности ограничена сверху в соответствии с вычисленной степенью истинности правила (нечеткое логическое И). Затем все нечеткие множества, назначенные для каждого термина каждой выходной лингвистической переменной, объединяются вместе, и формируется единственное нечеткое множество – значение для каждой выводимой лингвистической переменной. На выходе системы в зависимости от значения логического вывода формируется информационный сигнал для оперативного персонала. Логический вывод может принимать значение согласно таблице 3.

Таблица 3. Лингвистические значения переменных

Символическое обозначение	Англоязычная нотация	Русскоязычная нотация
NB	Negative Big	Отрицательное большое (наличие диагностических признаков значительного развития дефекта)
NM	Negative Middle	Отрицательное среднее (наличие устойчивых диагностических признаков дефекта)
NS	Negative Small	Отрицательное малое (наличие диагностических признаков дефекта на начальной стадии развития)
PS	Positive Small	Положительное малое (отклонение диагностических признаков на уровне допустимого)
PB	Positive Big	Положительное большое (все параметры на уровне нормативных)

Например, при работе системы диагностики на неявнополусной СМ и при логическом заключении **NS** (наличие диагностических признаков дефекта на начальной стадии развития) формируется сигнал о наличии признаков виткового замыкания и инструкция по управлению развитием дефекта

Суть инструкции сводится к изменению теплового режима работы СМ за счет изменения тока возбуждения и интенсивности охлаждения, что должно привести к изменению температуры обмотки и величины ее термомеханического удлинения. Перемещения обмотки в пазах может привести к изменению объема ВЗ. При этом скорость нарастания числа замкнутых витков снижается.

В случае, когда система диагностики выдает логическом заключении **NB**, возникает необходимость немедленного останова машина. Сигнал **NB** возможно использовать как резервную защиту, поскольку при развитом ВЗ машина должна отключаться основной виброзащитой.

Заключение

В диссертации изложены новые научно обоснованные технические решения в виде способов и алгоритмов эффективной оценки технического состояния синхронных машин, объединенных в единую концепцию построения интеллектуальной системы диагностики. Выполненные в диссертации исследования вносят существенный вклад в развитие теории построения систем диагностики синхронных машин.

Наиболее существенные научные и практические результаты заключаются в следующем:

1. Предложена и апробирована концепция построения системы технической диагностики и прогнозирования состояния обмотки ротора синхронной электрической машины. Подтверждением оригинальности предложенной концепции являются следующие обоснованные положения:

1.1. Предложена идея, согласно которой повышение достоверности диагностирования и обеспечение селективности определения вида дефекта в обмотке ротора синхронной электрической машины достигается комплексным сопряжением чувствительных способов выделения диагностической информации на основе методов интеллектуальной обработки цифровых сигналов. Продемонстрирована работоспособность предложенной концепции. Визуализация всех этапов принятия решения о наличии и виде дефекта проводилась в программном пакете Fuzzy Logic Toolbox.

1.2. Разработана методика фазификации трех основных входных диагностических сигналов блока интеллектуального экспертного принятия решений, а именно: сигналов измерения вибрации, несимметрии магнитного поля и нейросетевого определителя отклонения регулировочной характеристики синхронной машины. Для входных диагностических сигналов несимметрии магнитного поля и нейросетевого определителя отклонения регулировочной характеристики при фазификации диапазон изменения входных сигналов разбивается на пять входных терм, а для сигнала вибрации – на три. При этом форма входных терм настраивается экспертом исходя из

специфики конструкции и условий эксплуатации конкретной диагностируемой синхронной электрической машины.

2. Предложена и апробирована методика построения дискретной математической модели синхронной электрической машины с витковым замыканием в обмотке ротора. Подтверждением оригинальности предложенной методики являются следующие обоснованные положения:

2.1. Предложено применить билинейное преобразование к математической модели в трехфазной естественной системе координат, составленной на основе физически обоснованных уравнений электрического равновесия в статорных и роторных цепях без необходимости предварительного приведения системы к нормальной форме Коши. Составленная система дифференциальных уравнений подвергается алгебраизации в три этапа. На первом этапе модель записывается в изображениях по Лапласу, на втором – производится билинейная подстановка, на третьем – переход от неявной формы записи системы разностных уравнений к явной, путем аналитического обращения матрицы A собственной динамики системы. Преимуществом билинейного преобразования при построении дискретной математической модели является сохранения практически всех свойств динамической системы-прототипа, что подтверждается характером распределения корней характеристического уравнения в окрестности единичного радиуса комплексной плоскости.

2.2. В результате сравнения временных рядов переменных состояний, полученных экспериментально, и на основе разработанной дискретной математической модели показано, что итоговая погрешность моделирования не превышает 5 %. Такая погрешность является приемлемой при настройке системы диагностики.

Теоретически обоснованы и экспериментально апробированы новые чувствительные методы выявления виткового замыкания в обмотке ротора на основе анализа ЭДС на выходе индукционного магнитометрического датчика, установленного в торцевой зоне синхронной машины.

3. Метод выявления диагностического признака виткового замыкания обмотки явнополюсного ротора синхронной машины на основе выделения гармонической компоненты из выпрямленного сигнала ЭДС на выходе индукционного магнитометрического датчика, с чувствительностью в 2,5-2,75 % витков полюса ротора, за счет специально настроенного эллиптического фильтра минимального порядка. Разработана методика настройки фильтра, в которой использованы характерные данному виду фильтра локальные неоднородности амплитудно-частотной характеристики, что позволило при качественном выделении полезного сигнала значительно минимизировать порядок фильтра и отказаться от использования фильтра высоких частот.

4. Метод выявления диагностического признака виткового замыкания обмотки неявнополюсного ротора синхронной машины из сигнала ЭДС на выходе индукционного магнитометрического датчика, основанного на декомпозиции сигнала по функциям Лагерра. Экспериментально доказана чувствительность метода к витковому замыканию обмотки полюса на уровне

2-2,5 % витков полюса ротора.

5. Метод выявления диагностического признака виткового замыкания обмотки неявнополюсного ротора синхронной машины из сигнала ЭДС на выходе индукционного магнитометрического датчика, в котором на основе методов адаптивной идентификации вычисляется коэффициент несимметрии полуволн сигнала. Экспериментально доказана чувствительность метода к витковому замыканию обмотки полюса на уровне 1,5 % витков полюса ротора, что позволяет достоверно выделить замыкание одного витка обмотки полюса ротора у синхронных неявнополюсных машин.

6. Предложен и апробирован метод выявления диагностического признака виткового замыкания обмотки ротора на основе анализа переменных состояния синхронной электрической машины. Подтверждением оригинальности предложенного способа являются следующие обоснованные положения:

6.1. Предложен подход к построению структуры динамической нейронной сети, выходной сигнал которой является чувствительным к возникновению виткового замыкания в обмотке ротора. Отличительной особенностью предложенной структуры является то, что на вход подаются текущие и однократно задержанные сигналы статорных токов и напряжений в неподвижной системе координат α, β , тока и напряжения ротора, а также специального сигнала квазиреактивной мощности, вычисляемой как векторное произведение векторов тока и напряжения статора в неподвижной системе координат α, β ;

6.2. Для достижения высоких обобщающих свойств динамической нейронной сети предложен следующий комплекс мер: во первых – использование задержек входных сигналов обеспечивает чувствительность сети в динамических режимах; во вторых – применение гиперболического тангенса из класса гладких функций с неразрывными производными в качестве функции активации искусственных нейронов скрытого слоя позволяет обеспечить высокую чувствительность выходного сигнала нейронной сети к наличию повреждения с малым количеством замкнутых витков, вплоть до одного витка для машин средней и большой мощности. При проверке чувствительности на лабораторном синхронном генераторе экспериментально доказано, что разработанная нейронная сеть достоверно распознает замыкание 2 % витков от общего количества витков обмотки полюса ротора.

Основное содержание работы отражено в следующих публикациях

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК, и международных базах цитирования.

1. **Polishchuk, V.I.** Adaptive identification method of a signal from stray eld magnetic sensor for turbogenerator diagnostics / V.I. Polishchuk, V.L. Sergeev // Journal of Siberian Federal University. -2015. Vol. 8(2). – P. 201-207.

2. **Полищук, В.И.** Выявление витковых замыканий обмотки ротора синхронного генератора на основе вейвлет-анализа магнитных потоков рассеяния / А.А. Хамухин, В.И. Полищук // Известия Томского политехнического университета. -2013. - Т. 323, №. 5. – С. 85-94.

3. **Полищук, В.И.** Разработка и экспериментальная апробация метода функциональной диагностики обмотки ротора синхронного генератора / М.В. Крицкий, Ю.М. Серкова, Н.В. Герасимов // *Фундаментальные исследования*. - 2015. - № 11 (Ч. 6). - С. 1104-1108.

4. **Polishchuk, V.I.** Improvement of turn-to-turn short circuits diagnostic method based on ANN for synchronous generator excitation winding / V.I. Polishchuk, E.O. Kuleshova // *Applied Mechanics and Materials*. -2015. Vol. 792. – P.51-56.

5. **Polishchuk, V.** Induction Motor Drive Parameters Identification Applying Difference Schemes / E. Bolovin, A. Glazyrin, V. Polishchuk // *Applied Mechanics and Materials*. -2015. Vol. 698. – P. 65-68.

6. **Полищук, В.И.** Построение защиты от виткового замыкания в обмотке ротора синхронного генератора на основе индукционного датчика магнитного поля рассеяния / В.И. Полищук // *Известия Томского политехнического университета*. – 2012. – № 4. – С. 57-61.

7. **Полищук, В.И.** Функциональная вейвлет-диагностика состояния обмоток роторов трехфазных электрических машин по статорным токам / В.И. Полищук, А.С. Глазырин, Т.А. Глазырина, В.В. Тимошкин // *Электричество*. – 2012. – №6. – С. 42-49.

8. **Полищук, В.И.** Устройство защиты обмотки ротора синхронного генератора от двойных на землю и витковых замыканий / В.И. Полищук, А.Н. Новожилов, М.П. Воликова // *Электричество*. – 2012. – №6. – С. 54-59.

9. **Полищук, В.И.** Метод выявления витковых замыканий в обмотке возбуждения синхронного генератора / Т.И. Розум, В.И. Полищук // *Фундаментальные исследования*. – 2013. – № 8 (Ч. 5). – С. 1061-1065.

10. **Полищук, В.И.** Определение оптимальных параметров измерительного преобразователя индуктивного типа для диагностической системы электрических машин / В.И. Полищук, А.С. Глазырин, Е.В. Боловин // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. – 2013. – №7. – С. 143-149.

11. **Полищук, В.И.** Синтез фильтра минимального порядка для системы диагностики синхронного генератора / В.И. Полищук, С.А. Утанан // *Известия Томского политехнического университета*. – 2012. – Т.321. – № 5. – С. 110-112.

12. **Полищук, В.И.** Нейросетевая идентификация и диагностика электрических машин в условиях сильных импульсных помех / В.И. Полищук, Р.Ю. Ткачук, А.С. Глазырин, В.В. Тимошкин, Л.Е. Козлова // *Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока*. – 2011. – №2. – С. 282-286.

13. **Polishchuk, V.I.** Induction Motor Drives Parameters Identification Using Genetic Algorithms / V.I. Polishchuk, A.S. Glazyrin, R.Yu. Tkachuk // *Proceedings of IFOST 2012, Tomsk, September 18-21, 2012*. - New York: IEEE Council on Superconductivity. – 2012 – Vol. 2 – p. 586-589.

14. **Polishchuk V.I.** Adaptive systems of non-stationary signals identification with additional a-priori information / V.I. Polishchuk, V.L. Sergeev, V.T. Kalayda // *XI International IEEE Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2015)*, May 21–23, 2015, Omsk.

15. **Полищук, В.И.** Способ защиты обмотки ротора синхронного генератора от витковых замыканий на двух индукционных преобразователях / А.Н.

Новожилов, В.Н. Горюнов, Т.А. Новожилов, В.И. Полищук // "Электричество" – 2010. – №8. – С. 64-67.

16. **Полищук, В.И.** Разработка способа выявления виткового замыкания в обмотке возбуждения синхронной машины / В.И. Полищук, Ю.З. Васильева // Научное обозрение. – 2014. – №12. – С. 55-59.

17. **Полищук В.И.** Моделирование магнитных полей методом зеркальных отражений с коррекцией токов для синтеза защит электрических машин / А.Н. Новожилов, Т.А. Новожилов, О.А. Андреева, М.П. Воликова, В.И. Полищук // Электричество. – 2008. – №11, – С. 41-48

18. **Полищук В.И.** Критерии выбора уставок защит обмотки ротора синхронного генератора от витковых замыканий / В.И. Полищук, А.П. Кислов, А.Н. Новожилов // Изв.высш.учеб. заведений "Электромеханика". – 2009. – №6. – С. 74-77

19. **Полищук В.И.** Обзор способов диагностики эксцентриситета ротора машин переменного тока / В.И. Полищук, А.Н. Новожилов, Н.А. Исупова // Изв.высш.учеб. заведений "Электромеханика". – 2011. – №6. – С. 29-34.

20. **Полищук В.И.** Моделирование работы синхронного генератора при витковых замыканиях в обмотке ротора / В.И. Полищук, Т.И. Розум // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2013 – №. 2. – С. 323-327.

21. **Полищук В.И.** Оценивание параметров RL-цепей электромеханических систем в режиме функционирования на основе метода покоординатного спуска / В.И. Полищук, Т.Е. Хохлова, А.С. Глазырин // Известия Томского политехнического университета. – 2013 – Т. 322 – №. 2. – С. 41-46.

22. **Полищук В.И.** Моделирование магнитного поля рассеяния в торцевой зоне синхронных машин / В.И. Полищук // Известия Томского политехнического университета, – 2011, т. 319. – № 4. – С. 88-93.

23. **Полищук В.И.** Нечеткое управление бездатчиковым асинхронным электроприводом механизма транспортировки сыпучих материалов / К.С. Афанасьев, А.С. Глазырин, В.В. Тимошкин, В.И. Полищук // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2011. – №2. – С. 275-278.

24. **Полищук В.И.** Метод математического моделирования магнитного потока в вале и торцевом щите электрических машин / В.И. Полищук, О.В. Лиясова // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – №. 5. – С. 1-6.

25. **Полищук В.И.** Применение гибридных фаззи-регуляторов для улучшения динамики асинхронных электроприводов питателей сырого угля / В.И. Полищук, А.С. Глазырин, В.В. Тимошкин, К.С. Афанасьев // «Вестник Самарского государственного технического университета». – 2012. – № 2(34) – С. 106-115

26. **Полищук В.И.** Методика моделирования влияния воздушного зазора на магнитное поле в торцевой зоне синхронного генератора / В.И. Полищук, А.В. Оболтина, О.В. Лиясова // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 10 (часть 6). – С. 1234-1237.

27. **Полищук В.И.** Экспериментальное определение статических характеристик нагрузок электротехнических систем / А.В. Панкратов, Н.Л. Бацева, В.И. Полищук // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2015 – Т. 15 – №. 1. – С. 11-20.

28. **Полищук В.И.** Идентификация параметров динамических объектов управления с применением генетических алгоритмов / В.И. Полищук, Р.Ю. Ткачук, А.С. Глазырин // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2012. – №1. – С. 384-390.

29. **Полищук В.И.** Идентификация параметров асинхронного двигателя с применением генетических алгоритмов / Р.Ю. Ткачук, А.С. Глазырин, В.И. Полищук // Омский научный вестник, – 2012. – №3. – С. 245-248.

30. **Полищук В.И.** Методика идентификации статических характеристик нагрузки по результатам активного эксперимента / В.И. Полищук, Ю.В. Хрущев, А.В. Панкратов, Н.Л. Бацева // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 325, № 4. – С. 164-175.

31. **Полищук В.И.** Защита электродвигателей на катушках индуктивности от витковых замыканий / М.Я. Клецель, А.Н. Новожилов, А.Г. Кошель, В.И. Полищук // Промышленная энергетика. – 1994. – №3. – С. 17-20.

32. **Polishchuk V.I.** Choosing a method of magnetic field calculation for determining the characteristics of a ring measuring converter / A.N. Novozhilov, V.I. Polishchuk // Source of the Document Elektrotehnika. – 1993. – (7), pp. 37-39.

33. **Polishchuk V.I.** Models and Algorithms of Non-Stationary Signal Identification in Conditions of Uncertainty / V.I. Polishchuk, V.L. Sergeev, V.T. Kalayda // XII International IEEE Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2016), May 12–14, 2016, Moscow, Russia.

34. **Polishchuk V.I.** Diagnostics System Improvement of Turn-to-Turn Short Circuits of Synchronous Generator Rotor Winding / V.I. Polishchuk, D.A. Gnetova // International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2016), May 19-20, 2016, Chelyabinsk.

Монография

35. **Полищук В.И.** Построение релейной защиты и диагностики ротора синхронного генератора на индукционных преобразователях / В.И. Полищук. Монография. – Павлодар: Издательство «Кереку». – 2010. – 114с.

Патенты

36. Пат. № 2546131 РФ, МПК H02H7/06. Способ защиты синхронной электрической машины от витковых замыканий обмотки ротора / **Полищук В.И.** Заявка № 2013127631/07; Оpubл. 10.04.2015. Бюл. №10.

37. Пат. № 121086 РФ, МПК G01R 31/34. Устройство для диагностики электродвигателей переменного тока / **Полищук В.И.**, Глазырина Т.А., Глазырин А.С., Тимошкин В.В. Заявка № 2012116366/28; опубл. 10.10.2012. Бюл. № 28.

38. Пат. № 2535297 РФ, МПК H02H3/00. Способ защиты электродвигателей от коротких замыканий / **Полищук В.И.**, Клецель М.Я., Машрапов Б.Е., Кабдуалиев Н. М. Заявка № 2013127380/07; опубл. 10.12.2014. Бюл. №34.

39. Пат. №27528 (KZ), МПК H02H 7/08. Способ защиты электродвигателей от коротких замыканий / Зайцева Н.М., Клецель М.Я., **Полищук В.И.** Официальный бюллетень. Пром. Собственность. 5.10.2013.- №10.

40. Пат. № 2570363 МПК G01R 31/34. Способ определения параметров электродвигателя / **Полищук В.И.**, Глазырин А.С., Глазырина Т.А., Боловин

Е.В. Заявка №2014129744/28; опубл. 10.12.2015 Бюл. № 34.

41. Пат. №22450 (KZ), МПК H02K 11/00, H02K 7/00. Устройство защиты синхронной электрической машины от витковых и двойных на землю замыканий в обмотке ротора / **Полищук В.И.**, Новожилов А.Н., Клецель М.Я., Новожилов Т.А. Официальный бюллетень. Пром. собственность. 15.04.2010, №4.

42. Пат. №21247 (KZ), МПК H02K 11/00, H02H 7/08. Способ защиты синхронной электрической машины от витковых и двойных на землю замыканий в обмотке ротора / Новожилов А.Н., Новожилов Т.А., **Полищук В.И.** / Официальный бюллетень. Пром. Собственность. 15.05.2009, №5.

43. Пат. №17810 (KZ). МПК H02K 11/00, H02H 7/08. Способ защиты синхронной электрической машины от витковых и двойных на землю замыканий обмотки ротора / Новожилов А.Н., Новожилов Т.А., **Полищук В.И.** Официальный бюллетень. Пром. Собственность. 15.09.2006, №9.

44. Пат. № 16742 (KZ). МПК H02H 7/08, H02K 11/00. Электрическая машина с встроенным блоком защиты от коротких замыканий обмотки статора / Новожилов А.Н., Воликова М.П., **Полищук В.И.** Официальный бюллетень. Пром. собственность. 15.12.2005, №12.

45. Пат. №3040 (KZ). МПК H02H 7/06, H02K 11/00. Способ защиты синхронной электрической машины от виткового замыкания / **Полищук В.И.**, Новожилов А.Н. Официальный бюллетень Пром. собственность. 15.03.1996, №3.

46. Пат. №5381 (KZ). МПК H01H 7/06. Способ защиты синхронной электрической машины от виткового замыкания / **Полищук В.И.**, Новожилов А.Н., Кислов А.П. Официальный бюллетень. Пром. собственность. 15.10.1997, №10.

47. Пат. №5816 (KZ). МПК G01R 31/34. Асинхронный двигатель с устройством для обнаружения поврежденного стержня короткозамкнутого ротора / **Полищук В.И.** Кислов А.П., Уваров О.А., Новожилов А.Н. Официальный бюллетень. Пром. собственность 15.01.1998. №1.

48. Пат. № 123541 МПК G01R 31/34. Устройство для определения параметров асинхронного двигателя / Глазырин А.С., Глазырина Т.А., Тимошкин В.В., Ткачук Р.Ю., **Полищук В.И.** Заявка № 2012132379/28; опубл. 27.12.2012. Бюл. № 36.

49. Пат. № 2483422 РФ, МПК H02R 21/00. Устройство управления асинхронным двигателем / **Полищук В.И.**, Глазырина Т.А., Глазырин А.С., Тимошкин В.В., Ткачук Р.Ю. Заявка № 2012109882/07; опубл. 27.15.2013. Бюл. № 15.

50. Пат. № 2483421 РФ, МПК H02R 21/00. Устройство управления асинхронным двигателем / Глазырина Т.А., Глазырин А.С., Тимошкин В.В., Ткачук Р.Ю., **Полищук В.И.** Заявка № 2012109969/07; опубл. 27.15.2013. Бюл. № 15.

51. Пат. № 2502079 РФ, МПК G01R 31/34. Способ определения параметров асинхронного электродвигателя / **Полищук В.И.**, Глазырина Т.А., Глазырин А.С., Тимошкин В.В., Ткачук Р.Ю. Заявка № 2012132386/28; опубл. 20.12.2013. Бюл. № 35.

52. Пат. № 151954 МПК G01R 31/34. Устройство для определения параметров асинхронного электродвигателя / **Полищук В.И.**, Глазырин А.С., Глазырина Т.А., Боловин Е.В. Заявка № 2014128182/28; опубл. 20.04.2015. Бюл. № 11.

53. Пат. № 152258 МПК G01R 21/133. Устройство для определения статических характеристик нагрузки по напряжению / **Полищук В.И.**, Гофман А.В., Бацева Н.Л., Панкратов А.В., Хрущев Ю.В. Заявка № 2014140614/28; опубл. 10.05.2015. Бюл. № 15.

54. Пат. № 152498 МПК G01R 21/133. Устройство для определения статических характеристик нагрузки по напряжению с защитой от аномальных искажений / **Полищук В.И.**, Гофман А.В., Бацева Н.Л., Панкратов А.В., Хрущев Ю.В. Заявка № 2014145821/28; опубл. 10.06.2015 Бюл. № 16.

55. Пат. № 2564692 МПК G01R 31/34 Способ определения параметров асинхронного электродвигателя / **Полищук В.И.**, Глазырин А.С., Глазырина Т.А., Боловин Е.В. Заявка № 2014128159/28; опубл. 10.10.2015 Бюл. № 28.

56. Пат. № 2569179 МПК G01R 21/133. Способ определения статических характеристик нагрузки по напряжению / **Полищук В.И.**, Гофман А.В., Бацева Н.Л., Панкратов А.В., Хрущев Ю.В. Заявка № 2014140613/28; опубл. 20.11.2015 Бюл. № 32.

57. Пат. № 273171 МПК G01R 21/133. Способ определения статических характеристик нагрузки по напряжению с защитой от аномальных искажений / **Полищук В.И.**, Гофман А.В., Бацева Н.Л., Панкратов А.В., Хрущев Ю.В. Заявка № 2014145422/28; опубл. 20.01.2016 Бюл. № 2.

58. Пат. № 159821 МПК G01R 31/00. Устройство для определения параметров асинхронного электродвигателя / **Полищук В.И.**, Глазырин А.С., Глазырина Т.А., Боловин Е.В. Заявка № 2014129648/28; опубл. 20.02.2016 Бюл. № 5.

59. Пат. № 2576330 МПК H02P 21/00, H02P 27/06, H02P 25/02. Электропривод переменного тока / **Полищук В.И.**, Тимошкин В.В., Глазырин А.С., Глазырина Т.А., Козлова Л.Е. Заявка № 2014138532/07; опубл. 27.02.2016 Бюл. № 6.

60. Патент № 2570363 МПК G01R 31/34. Способ определения параметров электродвигателя / **Полищук В.И.**, Глазырин А.С., Глазырина Т.А., Боловин Е.В. Заявка № 2014129744/28; опубл. 10.12.2015 Бюл. № 34.

61. Пат. № 2584338 МПК G01R 21/133. Способ определения статических характеристик нагрузки по напряжению / **Полищук В.И.**, Бацева Н.Л., Панкратов А.В. Заявка № 2015107215/28, заявл. 02.03.2015; опубл. 25.05.2016 Бюл. № 14.

В международных конференциях

62. **Полищук В.И.** Концепция современных интеллектуальных средств динамической идентификации, эксплуатационной диагностики и отказоустойчивой эксплуатации электромеханического оборудования тепловых электростанций / В.И. Полищук, А.С. Глазырин, В.В. Тимошкин // Материалы V Всероссийской научно-технической конференции, 17-18 мая 2012. – Томск: ТПУ. – С.156-158.

63. **Polishchuk V.I.** Protection of synchronous machine rotor windings from

damage / V.I. Polishchuk, T.I. Rozum // Materialy VIII mezinardni vedecko-prakticka conference: Dny vedy, 1-5 April 2012. – Prague. – 2012. – P. 24-26.

64. **Полищук В.И.** Способ защиты обмотки возбуждения синхронной машины от витковых коротких замыканий / Т.И. Розум, В.И. Полищук // Сборник трудов XVIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 3 т., 9-13 апреля 2012. – Томск: ТПУ. – 2012. – С. 99-100.

65. **Полищук В.И.** Выявление витковых замыканий обмотки ротора синхронного генератора на основе анализа локальных неоднородностей магнитных потоков рассеяния / А.А. Хамухин, В.И. Полищук, Е.О. Кулешова, Н.О. Шадрина // Научные труды IV международной научно-технической конференции «Энергетика глазами молодежи», Т. 1, 14-18 октября 2013. – Новочеркасск. – 2013. – С. 138-141.

66. **Полищук В.И.** Синхронды генератордың орамасын орамаралық түйсуден қорғаныстың тағайыншамасын тандау әдісі / М.К. Кайырбаев, В.И. Полищук // Материалы международной научной конференции молодых ученых, студентов и школьников «VI Сатпаевские чтения», Т. 17, – Павлодар. – 2008., – С. 56-60.

67. **Полищук В.И.** Способ выделения полезного сигнала для защиты от витковых и двойных на землю замыканий обмотки ротора синхронных генераторов / В.И. Полищук // Международная практическая конференция «Повышение качества образования и научных исследования» в рамках VII Сатпаевских чтений. – Экибастуз. – 2009.

68. **Полищук В.И.** Критерии выбора уставок защит обмотки ротора СГ от витковых замыканий / А.Н. Новожилов, В.И. Полищук, А.П. Кислов // Материалы IV международной научно-технической конференции «Электромеханические преобразователи энергии». – Томск. – 2009. – С. 65-69.

69. **Полищук В.И.** Моделирование работы синхронного генератора на основе дифференциальных уравнений с периодическими коэффициентами / В.И. Полищук // Международная практическая конференция «Повышение качества образования и научных исследования» в рамках VIII Сатпаевских чтений. Экибастуз. – 2009.

70. **Полищук В.И.** Возможности математической модели явнополюсного синхронного генератора с дифференциальными уравнениями для фазных напряжений / А.Н. Новожилов, В.И. Полищук // Материалы республиканской научно-технической конференции «II чтения Ш. Шокина». – Павлодар. – 2006. – С. 191-202.

71. **Полищук В.И.** The way of synchronous generator's rotor winding protection from turns short circuits on two induction converters / А.Н. Новожилов, М.П. Воликова, В.И. Полищук // Материалы 13-ой международной конференции «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты». сентябрь 2010. – Алушта. –2010. – С. 84-85.

72. **Полищук В.И.** Метод выявления витковых замыканий в обмотке возбуждения синхронного генератора / Т.И. Розум, Е.О. Кулешова, В.И. Полищук // Научные труды IV международной научно-технической конференции "Россия молодая: передовые технологии - в промышленность". –

2013. – №. 2. – С. 314-317.

73. **Полищук В.И.** Разработка и экспериментальная апробация способа выявления повреждений в обмотке возбуждения синхронного генератора / О.В. Лясова, В.И. Полищук // Молодежный научный форум: Технические и математические науки: электронный сборник статей по материалам VI студенческой международной заочной научно-практической конференции, 1-28 Декабря 2013. – Москва: МЦНО, – 2013. – С. 110-115.

74. **Полищук В.И.** Разработка способа определения повреждения в обмотке ротора синхронных генераторов / В.И. Полищук, О.В. Лясова // Инновационный потенциал, состояние и тенденции развития в экономике, технике, физике, математике: сборник научных статей международной научно-практической конференции. – Санкт-Петербург: КультИнформПресс. – 2013. – С. 272-274.

75. **Полищук В.И.** Development of short circuit of coils protection of synchronous generator rotor windings / О.В. Лясова, В.И. Полищук // Образованието и науката на XXI век – 2013: материали за 9-а Международна научна практична конференция. 15-25 Октября 2013. – София (Болгария): "Бял ГРАД-БГ" ООД, 2013 - Т. 14. Технологии. Физическа култура и спорт – С. 34-39.

76. **Полищук В.И.** Разработка архитектуры интеллектуальной системы функциональной диагностики турбогенератора / Т.И. Розум, В.И. Полищук // Электроэнергетика глазами молодежи: сборник докладов V международной молодежной научно-технической конференции. 10-14 ноября 2014. – Томск, в 2 т. – Т. 2. – С. 65-68.

77. **Polishchuk V.I.** Development of synchronous generator protection method against turn-to-turn short circuit rotor winding / Y.Z. Vasiljeva, V.I. Polishchuk // Zpravy vedecke ideje 2014: materialy X mezinarodni vedecko-prakticka conference, Prague, 27 January-5 February 2014. – Praha: Education and Science. –2014. – Vol. 11. Technike vedy. Moderni informacni technologie. Fyzika. – P. 97-100.

78. **Полищук В.И.** Диагностика повреждения короткозамкнутой обмотки ротора асинхронного двигателя / Ю.З. Васильева, В.И. Полищук // Технические науки в России и за рубежом: материалы IV междунар. науч. конф. Москва. – М.: Буки-Веди. – 2015.

79. **Polishchuk V.I.** Development of synchronous generator protection method against turn-to-turn short circuit rotor winding / Y.Z. Vasiljeva, Y.V. Shishkovskaya, V.I. Polishchuk // Лингвистические и культурологические традиции и инновации: сборник материалов XIV Международной научно-практической конференции, 12-15 Ноября 2014. – Томск: Изд-во ТПУ. – 2014. – С. 208-211.

80. **Полищук В.И.** Технология адаптивной идентификации нестационарных сигналов / В.И. Полищук, Ю.З. Васильева // Электроэнергетика глазами молодежи: сборник докладов VI международной молодежной научно-технической конференции. 9-13 ноября 2015. – Иваново. – Т. 2. – С. 445-449.

В других изданиях.

81. **Полищук В.И.** Разработка архитектуры интеллектуальной системы функциональной диагностики турбогенератора / Т.И. Розум, В.И. Полищук // Вестник науки Сибири. – 2015. – №15. – С. 83-86.

82. **Polishchuk V.I.** Mathematical modeling approach of magnet flux of the end shield of the turbo-generator / V.I. Polishchuk // Вестник Павлодарского государственного университета. – 2010. – № 3. – С. 89-94.

83. **Polishchuk V.I.** Simulation of magnet flux in end shield for synchronous turbo-generator / V.I. Polishchuk // Nauka i studia. – 2010, т.3, №27, – P. 89-94.

84. **Полищук В.И.** Особенности использования рядов Фурье при построении системы диагностики электрических машин / В.И. Полищук, А.Н. Новожилов, О.А. Андреева, Л.О. Пфлюг, М.П. Воликова // Вестник Павлодарского государственного университета. – 2005. – №3. – С. 121-129.

85. **Polishchuk V.I.** The method of synchronous machine field-winding protection from turn-to-turn short circuit / V.I. Polishchuk, T.I. Rozum // Nauka I studia. – №7(52). – 2012. – P. 15-20.

86. **Полищук В.И.** Развитие теории математического моделирования работы явнополюсного синхронного генератора / В.И. Полищук, А.Н. Новожилов // Вестник Павлодарского государственного университета. – 2006. – №3. – С. 81-98.

87. **Полищук В.И.** Развитие теории математического моделирования работы неявнополюсного синхронного генератора / В.И. Полищук, А.Н. Новожилов // Вестник Павлодарского государственного университета. – 2006. – №4. – С. 83-93.

88. **Полищук В.И.** Способ защиты от витковых замыканий в обмотке ротора синхронного генератора / А.Н. Новожилов, Т.А. Новожилов, В.И. Полищук // Вестник Павлодарского государственного университета. – 2007. – №2. – С. 71-83.

89. **Полищук В.И.** Критерии выбора уставок защит обмотки ротора СГ от витковых замыканий / А.Н. Новожилов, Т.А. Новожилов, Полищук В.И. // Вестник Павлодарского государственного университета. – 2007. – №2. – С. 83-93.

90. **Полищук В.И.** Оценка остаточного ресурса турбогенераторов отработавших свой срок службы / В.И. Полищук // Вестник Павлодарского государственного университета. – 2010. – № 1. – С. 101-107.

Личный вклад автора. Все основные положения диссертации разработаны автором лично. Автору принадлежат общая постановка научных проблем, подходов, методов построения, основных решений и научное редактирование изданий полностью. В публикациях, выполненных в соавторстве, личный вклад оценивается на уровне 78 %.

Автореферат отпечатан с разрешения объединенного диссертационного совета ДМ212.178.03 при Омском государственном техническом университете и Омском государственном университете путей сообщения (Протокол № 8 от 24 ноября 2016 г.)

Заказ № 238. Тираж 100 экз.

Формат 60x84/16. Отпечатано на ризографе.

ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

Отдел типографии и оперативной печати
443100, г.о. Самара, ул. Молодогвардейская, 244