**Стеклов Алексей Сергеевич. Модели и алгоритмы диагностирования и прогнозирования технических состояний судовых электроэнергетических систем в условиях эксплуатации: диссертация ... кандидата Технических наук: 05.09.03 / Стеклов Алексей Сергеевич;[Место защиты: ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»], 2017.- 170 с.**

Министерство образования и науки Российской Федерации Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

им. Р.Е. Алексеева

На правах рукописи



**СТЕКЛОВ АЛЕКСЕЙ СЕРГЕЕВИЧ**

**МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ**

**ТЕХНИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ СУДОВЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ В**

**УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

05.09.03 - Электротехнические комплексы и системы

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: д.т.н., профессор,

**Титов Владимир Георгиевич**

Нижний Новгород 2017 г.

2

**Содержание**

4 И

ВВЕДЕНИЕ………………………………………………………………………… 4

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ И СИСТЕМ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СУДОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ……………………...8

1. Анализ современного уровня развития диагностического обеспечения судового энергетиче­ского оборудования…………………………………………………………………………………....9
2. Интеллектуальные системы диагностирования.………………………………………………..15
3. Существующие модели и методы прогнозирования технического состояния……………..19
4. Анализ проблем диагностирования и прогнозирования, состояние проблемы……………....27
5. Особенности судовых электроэнергетических систем с полупроводниковыми преобразова­телями……………………………………………………………………………………………… 29

Выводы по первой главе……………………………………………………………………………...37 ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА И ПОСТРОЕНИЕ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕ­СКОГО СОСТОЯНИЯ СЭЭС………………………………………………………………………..38

1. Судовые электроэнергетические системы как объект диагностирования……………………38
2. Специфические особенности диагностирования оборудования на судах…………………….39
3. Разработка структуры системы диагностики элементов СЭЭС……………………………….41

2.3.1 Основные неисправности и статистика отказов ГЭУ СЭЭС………………………………...42

2.3.2 Выбор диагностических параметров и разработка функциональных моделей  
диагностирования элементов СЭЭС 48

2.3.3 Математическое описание элементов СЭЭС в системе диагностики технического состоя-  
ния……………………………………………………………………………………………………..54

1. Разработка алгоритмов диагностирования элементов СЭЭС…………………………………64
2. Синтез алгоритмов диагностирования СЭЭС…………………………………………………..70 Выводы по второй главе……………………………………………………………………………...71 ГЛАВА 3 НЕЧЁТКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТЕПЕНЕЙ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЭЛЕК­ТРООБОРУДОВАНИЯ СЭЭС……………………………………………………… 72
3. Анализ условий работоспособности электроэнергетического оборудования……………….73
4. Метод определения степени работоспособности……………………………………………….75
5. Нейро-нечёткий подход к моделированию степени работоспособности элементов СЭЭС …………………………………………………………………………………………… 78
6. Синтез нейро-нечетких моделей определения степени работоспособности СЭЭС………128

Выводы по третьей главе………………………………………………………… 129

ГЛАВА 4 ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СЭЭС …………………..130

3

4.1 Прогнозирование степени работоспособности СЭЭС с помощью модели авто-регрессии  
проинтегрированного скользящего среднего (АРПСС)………………………………………….131

1. Прогнозирование с помощью гибридной нейронной сети…………………………………..145
2. Оценка точности прогноза……………………………………………………………………...152
3. Разработка экспертной системы диагностирования и прогнозирования технического состоя­ния СЭЭС……………………………………………………………………………………… 152

Выводы по четвертой главе………………………………………………………………………...157 ЗАКЛЮЧЕНИЕ……………………………………………………………………………………...158 Список принятых сокращений……………………………………………………………………..159 СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ……………………………………………….160 Приложение А……………………………………………………………………………………….168 Приложение Б………………………………………………………………………………………..170

4

**ВВЕДЕНИЕ**

**Актуальность работы.** Обеспечение безопасности мореплавания является важнейшим требованием к эксплуатации судна. Это в большой степени связано с обеспечением надежности работы судовых комплексов, которая, в свою очередь, зависит от их технического состояния. В процессе эксплуатации, в результате воздействия различных факторов, режимов и условий ра­боты, исходное техническое состояние электрооборудования непрерывно ухудшается, возрас­тает вероятность возникновения отказов.

Значительный износ электрооборудования приводит к дополнительным потерям энер­гии, снижению надежности функционирования, возрастанию его аварийности и отказов [1].

В свою очередь, надежная работа и, в частности, судовых электроэнергетических систем обеспечивается целым комплексом мероприятий, среди которых важное место отводится диа­гностике ее технического состояния [2;3].

Большинство отказов, влияющих на безопасность эксплуатации судовых электроэнерге­тических систем, зарождаются и проявляются именно в процессе эксплуатации, что требует наличия эффективной бортовой системы диагностики, определяющей техническое состояния СЭЭС в режиме реального времени. Трудность проведения диагностики СЭЭС в автоматиче­ском режиме в процессе эксплуатации связана с высокой сложностью судовых электроэнерге­тических установок, обусловленной многопараметричностью, многосвязностью, нелинейно­стью протекающих в них процессов, многорежимностью применения, что требует значитель­ных машинных и временных ресурсов.

На сегодняшний день СЭЭС имеют системы контроля параметров, осуществляющие вы­дачу информации об отказах систем и агрегатов, а также о превышении либо понижении допу­стимых значений некоторых параметров. Эта информация поступает к экипажу посредством показаний бортовых приборов, световых индикаторов либо звуковых сигналов. В итоге суще­ствующие системы контроля параметров СЭЭС констатируют произошедший факт отказа, не давая возможности экипажу его предотвратить. В современных условиях такие системы явля­ются не достаточно эффективными. Таким образом, существует проблема создания новых бор­товых систем технической диагностики СЭЭС, способных эффективно распознавать зарожда­ющие отказы и осуществлять прогнозирование технического состояния СЭЭС хотя бы на вре­мя, достаточное для безопасного завершения рейса (похода).

**Обоснование соответствия диссертации паспорту научной специальности 05.09.03. -«Электротехнические комплексы и системы».** Диссертационная работа соответствует фор­муле специальности в части исследования самостоятельного электротехнического комплекса, в качестве которого, рассматриваются элементы судовой электроэнергетической системы, тре-

бующие диагностики и прогнозирования технического состояния.

Отраженные в диссертации научные положения, соответствуют области исследования специальности по пункту 4 - исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах при разнообразных внешних воздействиях (глава 2 и глава 3) и пункту 5 - разработка безопасной и эффективной эксплуата­ции, электротехнических комплексов и систем (глава 4).

**Степень разработанности проблемы.** На протяжении десятков лет в развитие теории, разработку задач и методов диагностирования и прогнозирования судового энергетического оборудования вносили свой вклад коллективы ученых: ЦНИИМФ, ФГУП “Крыловский госу­дарственный научный центр”, ВМА им. Н. Г. Кузнецова, ЛЭТИ, НПО “Аврора”, ЦНИИ СЭТ, ГУМРФ им. адмирала С. О. Макарова, СПбГМТУ, КамчатГТУ, АГТУ и др. Исследованиям в этой области посвящены работы: Akademia Morska Gdynia, Instytut Technologii Eksploatacji PIB, Norvegian Shiping, Bulletinof Mar. Soc. и др. Отметим, что проблема диагностики и прогнозиро­вания состояния СЭЭС, не решена и за рубежом. Несмотря на большую актуальность, постав­ленные задачи решаются медленно, так как, процессы износа и старения электротехнического оборудования достаточно сложно поддаются точному математическому описанию и зависят от многочисленных факторов и, кроме того, исследования надежности и диагностики элементов СЭЭС, связаны с необходимостью проведения натурных испытаний (в том числе и разрушаю­щих) на дорогостоящем действующем оборудовании [4-14].

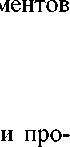
**Цель работы:** разработка моделей и алгоритмов для диагностирования и прогнозирова­ния технических состояний судовых электротехнических систем и рациональной архитектуры экспертной системы диагностирования и прогнозирования технических состояний СЭЭС.

го о на

Для достижения поставленной цели в диссертации решаются следующие научные и практические задачи:

- выполнен обзор и анализ современного уровня развития диагностического обеспечения  
судового энергетического оборудования;

- проведён экспертный анализ диагностических признаков, влияющих  
надёжности элементов СЭЭС;



* разработаны модели и алгоритмы диагностирования элементов СЭЭС;
* разработаны нейросетевые модели определения степени работоспособности эле СЭЭС;
* предложен подход к прогнозированию степени работоспособности СЭЭС;
* разработана рациональная архитектура экспертной системы диагностирования гнозирования технических состояний СЭЭС.

**Объект исследования** - судовая электроэнергетическая система.

**Предмет исследования -** диагностирование и прогнозирование технических состояний СЭЭС в целом, так и их элементов.

**Методы исследования.** Для решения поставленных задач использован метод проекти­рования экспертных систем, аппарат нейронных сетей; применены методы теории графов, ал­гебры логики, нечетких множеств, теории надежности; общей теории электрических машин.

**Научная новизна работы:**

* проведён детальный анализ диагностических признаков влияющих на показатели надёжности элементов СЭЭС, отличающийся тем, что предусматривает экспертную оценку взаимного воздействия механических и электрических параметров друг на друга, показываю­щий, что работоспособность объекта следует оценивать не по показаниям отдельных парамет­ров, а по их совокупности;
* разработаны алгоритмы диагностирования, созданные на основе теории графов, отли­чающиеся от известных тем, что позволяют упростить последующую техническую реализацию системы оперативной диагностики СЭЭС, поскольку сокращается число элементов, требующих проверки их состояния, без уменьшения требуемой глубины диагностирования;
* разработаны модели определения степени работоспособности элементов СЭЭС, на ос­нове нейро-нечеткого вывода Мамдани входами которых являются переменные, соответствую­щие значениям диагностических параметров. Применение нейро-нечеткого вывода Мамдани позволило формализовать процедуру оценки технического состояния на базе ненадёжной и возможно неточной информации и обоснованно принимать решения по идентификации неис­правностей;
* впервые предложен подход, позволяющий с помощью модели авто-регрессии проинте­грированного скользящего среднего (АРПСС) прогнозировать степень работоспособности СЭЭС при различных значениях эксплуатационных факторов;
* разработана рациональная архитектура и алгоритм универсальной автоматизированной экспертной системы диагностирования и прогнозирования технических состояний СЭЭС, отли­чающаяся использованием модуля прогнозирования степени работоспособности СЭЭС на ос­нове оценки временного ряда с помощью модели авто-регрессии проинтегрированного сколь­зящего среднего, позволяющая на ранней стадии оценить вероятность возникновения отказа.

**Практическая значимость.**

Предложенные алгоритмы диагностирования элементов СЭЭС представляют собой за­конченный продукт и могут быть интегрированы в программное обеспечение автоматической системы диагностики любой сложности.

Предложенные модели определения степени работоспособности элементов СЭЭС, могут служить основой для создания экспертной системы.

Разработанная структурная схема, алгоритм и подход к прогнозированию степени рабо­тоспособности, подготовлены для промышленной разработки системы диагностики с функцией прогнозирования в составе систем данного класса.

Материалы исследований используются в учебном процессе Нижегородского Государ­ственного Технического Университета им. Р.Е. Алексеева.

**Реализация результатов работы.** Результаты работы используются в виде методики оценки работоспособности элементов СЭЭС на ОАО Конструкторское бюро по проектирова­нию судов «Вымпел» г. Нижний Новгород.

**Основные положения диссертации, выносимые на защиту.**

Структура и алгоритмы диагностирования электротехнических объектов, позволяющие определять техническое состояние элементов СЭЭС.

Модели определения работоспособности элементов СЭЭС в зависимости от значений основных эксплуатационных факторов и компьютерные модели в Matlab Simulink.

Подход к прогнозированию технического состояния СЭЭС с помощью анализа времен­ных рядов.

**Апробация результатов работы.** Основные положения, результаты, выводы и рекомен­дации диссертационной работы доложены, обсуждены и получили положительные отзывы на региональных, всероссийских и международных научно-технических конференциях: НТК «Ак­туальные проблемы электроэнергетики» (г. Нижний Новгород, 2010, 2011, 2013, 2014, 2016, 2017 гг.); XVI Международной научно-практической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XVI Бенардосовские чтения) (г. Иваново 2011); XIX Междуна­родной научно-практической конференции «Инновации в науке: применение и результаты» (г. Новосибирск, 2015); Новейшие достижения в науке и образовании: отечественный и зарубеж­ный опыт Международная научно-практическая конференция (г. Смоленск, 2015); IX Между­народной (XX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2016 (ICPDS' г. Пермь, 2016), Международной научно-практической конференции «Наука сего­дня: проблемы и пути решения» (г. Вологда, 2017).

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 17 работ, включая 1 статью в Scopus и 5 статей в периодических журналах, рекомендованных ВАК, 6 статей в материалах Международных и Всероссийских конференций.

**Объем и структура работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и приложений. Объем диссертации составляет 170 стра­ниц основного текста, 121 рисунок, список литературы включает 106 наименований.

**Выводы по четвертой главе:**

1. Предложены подходы к прогнозированию степени работоспособности СЭЭС, позволя­ющие спрогнозировать степень работоспособности СЭЭС на определенный временной интер­вал.
2. Получены относительные ошибки прогнозирования не превышающие 5 % для гибрид­ной нейронной сети и 2 % для метода авто-регрессии проинтегрированного скользящего сред­него.
3. Разработана рациональная архитектура и алгоритм универсальной автоматизированной экспертной системы диагностирования и прогнозирования технических состояний СЭЭС, со­держащая модуль прогнозирования степени работоспособности СЭЭС на основе оценки вре­менного ряда с помощью модели авто-регрессии проинтегрированного скользящего среднего, позволяющая на ранней стадии оценить вероятность возникновения отказа.
4. Предложены интерфейсы модулей универсальной автоматизированной экспертной си­стемы “Диагностика” и “Прогноз”, предусматривающие сохранение результата и переход к ре­комендациям о проведении работ с оборудованием.
5. Предложены рекомендации по обслуживанию объекта в зависимости от спрогнозиро­ванной степени работоспособности:

* от 0 до 20% - уровень состояния «АВАРИЙНОЕ». Требуется вывод оборудования из строя, вследствие или для предотвращения аварии;
* от 20 до 40% - уровень состояния «ВЫВОД ИЗ СТРОЯ». Требуется техническое об­служивание (замена подшипников, проверка состояния изоляции и т.д.) возможен времен­ный вывод оборудования из строя;
* от 40 до 60% - уровень «ТО». Требуется техническое обслуживание (ревизия, осмотр, проверка состояния узлов), без вывода оборудования из строя;
* от 60 до 80% - уровень «КОНТРОЛЬ». Требуется дополнительная обработка данных по­лученных в ходе диагностики. Данный уровень подразумевает обработку данных для опре­деления возможных неконтролируемых в данный момент неисправностей, косвенно влия­ющих на значения контролируемых параметров;
* от 80 до 100 % - уровень «НОРМА». Система находится в рабочем состоянии, никаких дополнительных действий, кроме записи показаний системы не требуется.

158 ЗАКЛЮЧЕНИЕ В диссертационной работе решена задача создания моделей и методов диагностирования и прогнозирования судовых электроэнергетических систем в условиях эксплуатации. При этом получены следующие научные и практические результаты: 1. В результате работы был выполнен обзор и анализ современного уровня развития диа­гностического обеспечения судового энергетического оборудования. Выявлено, что современ­ные системы управления и мониторинга СЭЭС обладают рядом общих недостатков:

* отсутствуют прогнозирующие тренды технического состояния компонентов и СЭЭС в це­лом;
* не в полной мере определены интервалы считывания параметров, отображающих техни­ческое состояние.

2. Установлено, что доля отказов СЭЭС, вызвавших обесточивание судна, в среднем равна  
23 % от общего числа отказов. Стоимость технико-экономических последствий отказов одна из  
самых максимальных у синхронных генераторов. При этом 84,4 % отказов связано со статор-  
ными обмотками СГ.

3. Проведён детальный анализ диагностических признаков влияющих на показатели  
надёжности элементов СЭЭС, предусматривающий экспертную оценку взаимного воздействия  
механических и электрических параметров друг на друга, показывающий, что работоспособ­  
ность объекта следует оценивать не по показаниям отдельных параметров, а по их совокупно­  
сти.

1. Разработаны алгоритмы диагностирования СГ, Тр, ПЧ, ГЭД глубиной до 24 элементов позволяющие упростить последующую техническую реализацию системы оперативной диагно­стики СЭЭС, поскольку сокращается число элементов, требующих проверки их состояния, без уменьшения требуемой глубины диагностирования.
2. Предложены нейросетевые модели определения степени работоспособности элементов СЭЭС, позволяющие оценивать работоспособность судового электротехнического оборудова­ния.
3. Предложены подходы к прогнозированию степени работоспособности СЭЭС, позволя­ющие спрогнозировать степень работоспособности СЭЭС на определенный временной интер­вал. Получены относительные ошибки прогнозирования не превышающие 5 % для гибридной нейронной сети и метода авто-регрессии проинтегрированного скользящего среднего.
4. Разработана архитектура и алгоритм универсальной автоматизированной экспертной системы диагностирования и прогнозирования основных рабочих параметров СЭЭС, позволя­ющая на ранней стадии адекватно оценить растущую вероятность неисправности при измене­нии входных параметров в режиме реального времени.