

На правах рукописи



Шпет Наталья Анатольевна

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ
АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ ЛИФТОВ**

Специальность 05.09.01 –
«Электромеханика и электрические аппараты»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Томск – 2015

Работа выполнена на кафедре «Электротехнические комплексы и материалы» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и в акционерном обществе «Научно-производственный центр «Полус», г. Томск

Научный руководитель: **Муравлёв Олег Павлович**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Темлякова Зоя Савельевна**
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный
технический университет»,
профессор кафедры «Электромеханики»

Рикконен Сергей Владимирович
кандидат технических наук, доцент
НИИ прикладной математики и механики
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский
Томский государственный университет»,
старший научный сотрудник

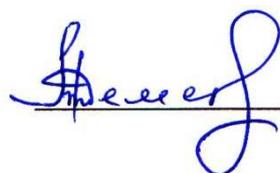
Ведущая организация: **Научно-исследовательский институт
автоматики и электромеханики Томского
государственного университета систем
управления и радиоэлектроники, г. Томск**

Защита состоится «11» ноября 2015 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.11 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, ул. Усова, 7, уч. корп. 8, ауд. 217.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634034, г. Томск, ул. Белинского, 55 и на сайте <http://portal.tpu.ru/council/2801/worklist>

Автореферат разослан «___» сентября 2015 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 212.269.11
кандидат технических наук

 Ю.Н. Дементьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. В настоящее время пассажирские лифты в России достигли широкого распространения, в эксплуатации насчитывается их около 500 тысяч. Поэтому в центре внимания находится повышение качества и надежности лифтов, а также организация и проведение работ по техническому обслуживанию, ремонту и модернизации.

Согласно техническому регламенту «О безопасности лифтов», утвержденному постановлением правительства Российской Федерации 2 октября 2009 г. № 782 назначенный срок службы лифтов составляет 25 лет, по истечении, которого проводится диагностическое обследование лифта с последующим ремонтом либо заменой его элементов и возможностью продления срока службы еще до 25 лет в зависимости от срока службы замененных узлов. Кроме того, массовый ввод лифтов в эксплуатацию пришелся на 80-е годы прошлого века, соответственно количество лифтов выработавших срок службы, составляет порядка 35% и продолжает расти.

Конструкция пассажирского лифта состоит из довольно большого числа элементов, которые должны обеспечить его надежную работу при эксплуатации. Одним из таких элементов является электродвигатель привода лебедки. Как правило, приводы пассажирских лифтов, установленных в жилых домах, не требуют непрерывного регулирования частоты вращения и поэтому оборудованы асинхронными двухскоростными двигателями с короткозамкнутым ротором. Асинхронные двигатели для лифтов (АДЛ), как и любые другие электрические машины, проектируются на длительный срок функционирования, но по причине различных скрытых дефектов и недостатков эксплуатации могут выходить из строя значительно раньше. Отказы АДЛ влекут за собой длительный простой лифтов и являются достаточно дорогостоящими по исправлению. Причиной затрат времени и средств на восстановительные работы служит не столько сложность двигателей, сколько их масса. Большинство отказов невозможно устранить в машинном помещении, возникает необходимость транспортирования на ремонтный участок. В связи с этим огромную важность приобретает повышение надежности АДЛ, которое на этапе эксплуатации достигается применением эффективной стратегии технического обслуживания и ремонта (ТОиР).

В настоящее время в нашей стране при ремонте элементов лифтов в жилых домах используется разработанная во второй половине прошлого столетия система планово-предупредительного ремонта (ППР). Обладая большими достоинствами, такая система не учитывает количественные показатели надежности элементов, в частности АДЛ, которые можно вычислить, имея статистический материал об их отказах, полученный в процессе эксплуатации. Но, несмотря на огромный парк пассажирских лифтов, отдельно по каждому из элементов статистика не ведется. Информация об отказах лифтов и проведенных работах лишь фиксируется в общем журнале. Значительную трудность в сборе и обработке информации, необходимой для оценки эксплуатационной надежности АДЛ, представляет достаточно длительный процесс их эксплуатации, измеряемый иногда десятилетиями. Найти выход из сложившейся ситуации можно, прогнозируя случайный процесс возникновения отказов АДЛ исходя из наблюдений за ними в прошлом. Вопросы прогнозирования состояния технических объектов на настоящем этапе развития

науки становятся очень актуальными. Кроме того, моделирование и прогнозирование эксплуатационной надежности таких двигателей невозможно осуществить с помощью классической теории надежности, так как эксплуатационная информация представляется в виде специфических данных предполагающих наличие как отказавших так и исправных двигателей, которые носят название цензурированных. Цензурирование – это событие, приводящее к прекращению наблюдения за объектом до наступления отказа определенного вида или предельного состояния. Наличие цензурирования снижает точность оценки показателей надежности и требует определенного подхода, поэтому разработка и совершенствование методов оценки таких выборок является наиболее современным направлением в развитии теории надежности. Кроме того, большие возможности для этого появились с развитием компьютерной техники. Создание компьютерных программ снижает трудоемкость исследований и увеличивает их точность.

В виду отсутствия в настоящее время эксплуатационной информации АДЛ и необходимости обеспечения и повышения их надежности ниже сформулированы основные направления исследования.

Цель работы. Исследование эксплуатационной надежности асинхронных двигателей для лифтов на основе информации об отказах узлов, прогнозирование их эксплуатационной надежности и совершенствование системы текущего обслуживания и ремонта.

Комплекс задач, который необходимо решить для реализации поставленной цели:

1. Собрать и провести анализ статистического материала об отказах элементов пассажирских лифтов с помощью системного анализа. Оценить влияние элементов на систему в целом, конечной целью которой является повышение надежности и безопасности использования пассажирских лифтов.

2. Сформировать массив статистических данных двухскоростных асинхронных двигателей для лифтов, полученных в реальных условиях эксплуатации, исследовать условия работы АДЛ и особенности конструкции, выбрать метод моделирования эксплуатационной надежности.

3. Разработать математическую модель оценки эксплуатационной надежности АДЛ, позволяющую оперативно оценивать показатели надежности на основе массива данных, состоящего из произвольных наработок до отказа и цензурированных наработок, реализовать ее с помощью программного обеспечения.

4. Определить количественные значения показателей эксплуатационной надежности узлов АДЛ, используя сформированный массив данных и разработанную программу для ЭВМ.

5. Разработать математическую модель прогнозирования, основой которой служит математическая модель оценки эксплуатационной надежности АДЛ, позволяющую определить периоды эксплуатации и оценить остаточный ресурс.

6. Разработать рекомендации по совершенствованию системы технического обслуживания и ремонта АДЛ на основе массива статистических данных и математической модели прогнозирования эксплуатационной надежности.

Объект исследования. Двухскоростные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором, используемые в приводе пассажирских лифтов.

Предмет исследования. Методы моделирования эксплуатационной надежности, методы прогнозирования эксплуатационной надежности, системный анализ, математические модели и алгоритмы, принципы совершенствования технического обслуживания и ремонта электрических машин.

Методы исследования. Поставленные в диссертационной работе задачи решаются методами теории вероятности, математической статистики, теории электрических машин, теории надежности электрических машин, математического моделирования, прогнозирования, математического программирования, совершенствования систем технического обслуживания и ремонта.

Для исследований использованы следующие пакеты прикладных программ: Word, Excel, MathCAD. Программная реализация математической модели эксплуатационной надежности АДЛ на основе цензурированных выборок получена с помощью MathCAD.

Достоверность полученных результатов. Достоверность полученных научных результатов обосновывается корректным применением теоретических методов, их сходимостью с фактическими данными, полученными в реальных условиях эксплуатации АДЛ, большим объемом статистической информации, подтверждены актами внедрения на предприятиях.

Научная новизна заключается в следующем:

1. Разработана математическая модель оценки эксплуатационной надежности АДЛ, основанная на методах статистического и вероятностного анализа. Предложенная модель отличается от существующих тем, что позволяет определять параметры распределений Вейбулла, экспоненциального, нормального, логарифмически-нормального на основе статистических данных, состоящих из произвольных наработок до отказа и цензурированных наработок. Математическая модель позволяет проводить выбор модели надежности, которая наиболее подходит для описания данных, полученных в реальных условиях эксплуатации АДЛ и рассчитывать количественные показатели надежности, необходимые для улучшения АДЛ на стадиях проектирования и изготовления, а также совершенствования системы их технического обслуживания и ремонта.

2. Разработана математическая модель прогнозирования эксплуатационной надежности статоров АДЛ, основанная на математической модели оценки эксплуатационной надежности АДЛ по цензурированным данным, представляющей собой математические формулы и связи между ними. Полученная модель позволяет построить «кривую жизни» АДЛ, определить вероятность безотказной работы на каждом периоде эксплуатации и определить ресурс до капитального ремонта АДЛ с помощью наблюдений на коротком интервале времени за группами АДЛ, имеющими различный период функционирования до начала исследований.

3. Разработан алгоритм проведения технического обслуживания и ремонта АДЛ на основе математической модели прогнозирования их эксплуатационной надежности, учитывающей изменение функции вероятности безотказной работы по различным законам распределения на каждом этапе эксплуатации, интервальные оценки средних наработок до отказа и требуемый технической документацией уровень надежности.

Практическая ценность работы:

1. Впервые получены и систематизированы статистические данные об отказах элементов пассажирских лифтов, на основе которых выявлены наиболее «слабые» из них. Методом экспертного опроса установлены элементы, определяющие эксплуатационную надежность лифтов. Проведен анализ причин отказов АДЛ, получено распределение отказов по узлам.

2. Разработана программа «Оценка эксплуатационной надежности технических устройств по цензурированным данным», предназначенная для оценки эксплуатационной надежности АДЛ по информации об отказах, поступившей в процессе работы в виде цензурированных данных, которая позволяет осуществить построение гистограмм эмпирического распределения наработок, расчет параметров моделей надежности, построение теоретических зависимостей моделей надежности, выбор модели надежности с помощью коэффициента корреляции между эмпирическим и теоретическим распределением наработок.

3. Определена периодичность текущих ремонтов и ресурс до капитального ремонта АДЛ на основе предложенной математической модели прогнозирования, что позволяет повысить эксплуатационную надежность АДЛ и уменьшить длительность простоя пассажирских лифтов, необходимого для восстановления их работоспособного состояния.

4. Разработаны рекомендации по совершенствованию системы организации технического обслуживания и ремонта АДЛ, которые позволяют своевременно выявить и устранить, возникшие в процессе эксплуатации повреждения узлов и деталей АДЛ, а также оперативно провести контроль качества их текущего ремонта.

Реализация и внедрение результатов работы. Полученные результаты диссертационной работы используются для оценки эксплуатационной надежности лифтовых асинхронных двигателей, составлении планов и объемов текущего обслуживания и ремонта на ООО «Томская лифтовая компания» и для корректировки показателей надежности, установленных в технических условиях, а также совершенствования проектирования и технологии изготовления асинхронных двигателей для лифтов на ООО «НПО «Сибэлектромотор».

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Результаты определения значимости элементов пассажирского лифта на основе его структурной модели методом экспертного опроса и анализа отказов, которые позволили организовать прогнозирование эксплуатационной надежности асинхронных двигателей для лифтов.

2. Математическая модель оценки показателей эксплуатационной надежности технических устройств реализована в редакторе MathCAD и позволяет учесть произвольные наработки до отказа и цензурированные наработки высоконадежных асинхронных двигателей для лифтов.

3. «Кривая жизни» статоров асинхронных двигателей для лифтов впервые получена при изучении большого массива данных по эксплуатационной надежности и предназначена для прогнозирования их ресурса и совершенствования системы технического обслуживания и ремонта.

4. Рекомендации по совершенствованию системы организации технического обслуживания и ремонта асинхронных двигателей для лифтов, которые основаны на результатах исследования их эксплуатационной надежности.

Личный вклад в работу. Результаты проведенных исследований получены автором самостоятельно, включая анализ литературы, постановку задач исследования, сбор исходных данных по отказам элементов пассажирских лифтов, обработку статистического материала, разработку математических моделей, синтез программы для ЭВМ, проведение расчетов, анализ результатов, совершенствование системы ТОиР.

Апробация работы. Основные результаты проведенных диссертационных исследований докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

1. Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (ТПУ, г. Томск, 2011–2014 гг.).

2. Международная научно-техническая конференция «Электромеханические преобразователи энергии» (ТПУ, г. Томск, 2011 г., 2013 г.).

3. V Всероссийская научно-техническая конференция «Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования» (ТПУ, г. Томск, 2012 г.).

4. XIX Научно-техническая конференция «Электронные и электромеханические системы и устройства» (АО «НПЦ «Полус», г. Томск, 2015 г.).

Публикации. По результатам диссертационных исследований, опубликовано 12 печатных работ, среди которых 3 статьи опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 8 докладов в материалах научно-технических и научно-практических конференциях, получено одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Оценка эксплуатационной надежности технических устройств по цензурированным данным» № 2014618241 от 13.08.2014 г.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из оглавления, введения, 4 глав, заключения, перечня сокращений, списка литературы из 152 наименований и 5 приложений. Общий объем работы составляет 214 страниц машинописного текста, содержит 30 таблиц и 30 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность цели исследований, показаны комплекс решаемых задач, научная новизна и практическая ценность.

В первой главе проведен обзор существующих работ по надежности асинхронных двигателей (АД) и системам технического обслуживания и ремонта. Сформулированы проблемы повышения надежности АД на этапах проектирования, изготовления и эксплуатации. Предотвращением отказов занимается теория прогнозирования технического состояния и эксплуатационной надежности объектов, неразрывно связанная с теорией надежности. Обнаружение дефектов узлов двигателей на ранней стадии их развития позволяет проводить техническая диагностика. Проведен анализ существующих систем ТОиР, отмечены их достоинства и недостатки.

Исследована конструкция АДЛ и условия их эксплуатации. Основными отличительными особенностями АДЛ, установленных в жилых домах, от других серий двигателей является повышенное значение пускового момента, наличие двух обмоток обеспечивающих плавное движение кабины лифта, наличие встроенных датчиков температурной защиты, работа в периодическом повторно-

кратковременном режиме с частыми пусками и электромагнитным торможением, малошумное исполнение.

Проведен анализ отказов АД общепромышленного назначения, крановых и взрывозащищенных. В результате выявлено, что распределение отказов зависит от назначения двигателей и варьируется в зависимости от частоты вращения, мощности и условий окружающей среды. Поэтому следует сделать вывод, что для изучения надежности АДЛ необходимы дополнительные исследования.

Проанализированы методы моделирования эксплуатационной надежности технических устройств. Применительно к АДЛ при имеющейся информации об отказах, наиболее целесообразно применять параметрические вероятностно-статистические методы. Огромной трудностью в оценке и повышении эксплуатационной надежности АДЛ является недостаточное количество информации об их отказах, несмотря на огромный парк пассажирских лифтов. Выход из сложившейся ситуации можно найти, совершенствуя методики расчета количественных показателей надежности по цензурированным выборкам.

Проведена постановка задач исследования, необходимых для достижения цели диссертационной работы.

Во второй главе было проведено статистическое моделирование эксплуатационной надежности асинхронных двигателей для лифтов.

С помощью системного анализа упорядочены элементы пассажирского лифта и определен порядок расчета его надежности, что представлено структурной моделью, имеющей вид дерева целей. Уровень общей цели представляет собой обеспечение надежности пассажирского лифта в целом.

Определение значимости элементов на основе его структурной модели проведено методом экспертного опроса и с помощью анализа распределения отказов по данным эксплуатации 446 идентичных по устройству и назначению тихоходных пассажирских лифтов грузоподъемностью до 400 кг, установленных в период с 1986 г. по 2011 г. в жилых домах этажностью от 8 до 17 в г. Томске.

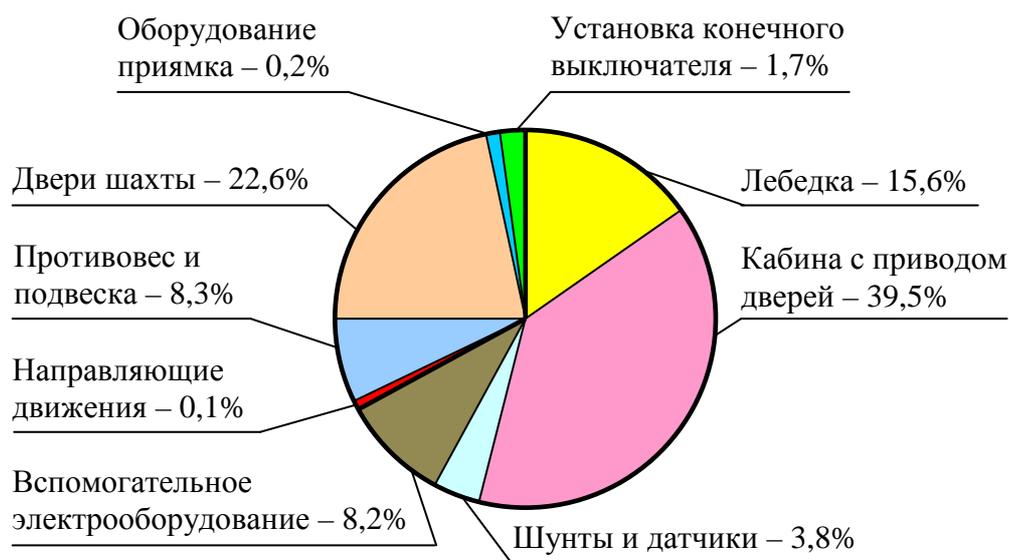


Рис. 1. Распределение отказов лифта на втором уровне дерева целей

На первом уровне наиболее весомой является подсистема электрооборудования (67,1% отказов) по сравнению с механической подсистемой

(32,9% отказов), что подтверждают результаты, полученные методом экспертного опроса, при котором учитывалось не только количество отказов элементов, но и длительность простоя лифта при выходе их из строя, сложность и стоимость восстановления, безопасность перевозки пассажиров. Распределение отказов на втором уровне дерева целей представлено на рис. 1. Распределение отказов лебедки на третьем уровне представлено на рис. 2. На четвертом уровне находятся узлы и детали элементов лифта.

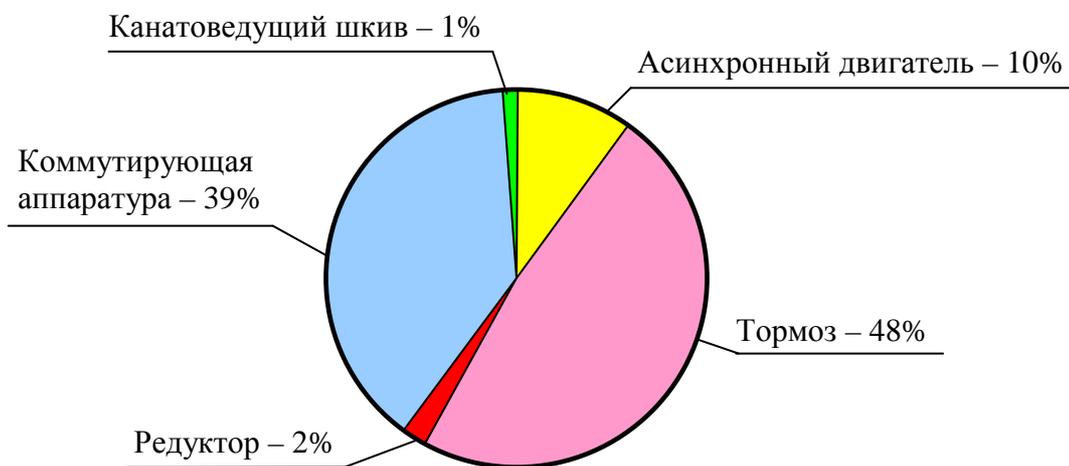


Рис. 2. Распределение отказов лебедки на третьем уровне дерева целей

Анализ результатов показал необходимость исследования АДЛ как элемента в значительной степени определяющего надежность лебедки и лифта. Несмотря на то, что на двигатели приходится только 10% отказов, по мнению экспертов, эти отказы приводят к длительному простоям пассажирских лифтов и являются наиболее дорогими по исправлению.

Получено распределение отказов по узлам АДЛ. Наиболее частой причиной простоя лифтов по вине АДЛ стало срабатывание их датчиков температурной защиты (38,4%) в результате нагрева обмотки статора (ОС). ДТЗ предотвращают выход из строя двигателя, но приводят к отключению лифта системой управления и требуют обнаружения причин повышенного нагрева обмоток, поэтому срабатывание рассматривалось как отказ. В 12,8% случаях произошел перегрев ОС без аварийного отключения двигателей в результате неисправностей системы управления и ДТЗ. Увлажнение ОС, ставшее причиной пониженного сопротивления их изоляции, было обнаружено в 11,6% случаях. Не устраненное низкое сопротивление изоляции привело в результате к межвитковым (5,8%), межфазным (1,2%) замыканиям и пробоем пазовой изоляции (1,2%). Чаще по отношению к другим видам отказов происходит ослабление крепления лобовых частей ОС (4,6%) и ослабление крепления АДЛ (3,5%). Плохо закрепленные лобовые части в свою очередь нарушают пазовую изоляцию (2,3%) и приводят к ослаблению прессовки сердечника (2,3%). Из перечисленного можно сделать вывод о том, что статор является наиболее аварийным узлом АДЛ. Следующее место по количеству отказов занимают подшипниковые устройства. Причинами их выхода из строя послужили механический износ (2,3%) и разрушение (1,2%), шум (2,3%) и отсутствие смазки (2,3%). Наиболее надежными элементами являются ротор, вал и корпусные детали.

Для оценки эксплуатационной надежности АДЛ вероятностно-статистическим методом были выбраны следующие показатели: интенсивность отказов $\lambda(t)$, вероятность безотказной работы $P(t)$ и средняя наработка до отказа T_{cp} . Разработана математическая модель (ММ), алгоритм которой представлен на рис. 3. При разработке ММ необходимо приняты следующие допущения:

1. Массив исходных данных состоит из независимых наработок до отказа и наработок до цензурирования АДЛ.

2. Исследуемые АДЛ эксплуатируются в приблизительно одинаковых условиях, имеют однотипную конструкцию, близкую мощность и частоту вращения.

3. Здания, в которых установлены лифты, имеют близкую этажность и назначение. Лифты, в свою очередь, имеют одинаковую конструкцию и грузоподъемность.

4. Анализ эксплуатационной надежности АДЛ выполняется с помощью моделей надежности наиболее часто применяемых для электротехнических изделий: экспоненциальной, Вейбулла, нормальной и логарифмически-нормальной.

5. Двигатели, входящие в исследуемую выборку являются либо новыми, либо перед началом наблюдений прошедшими текущий ремонт.

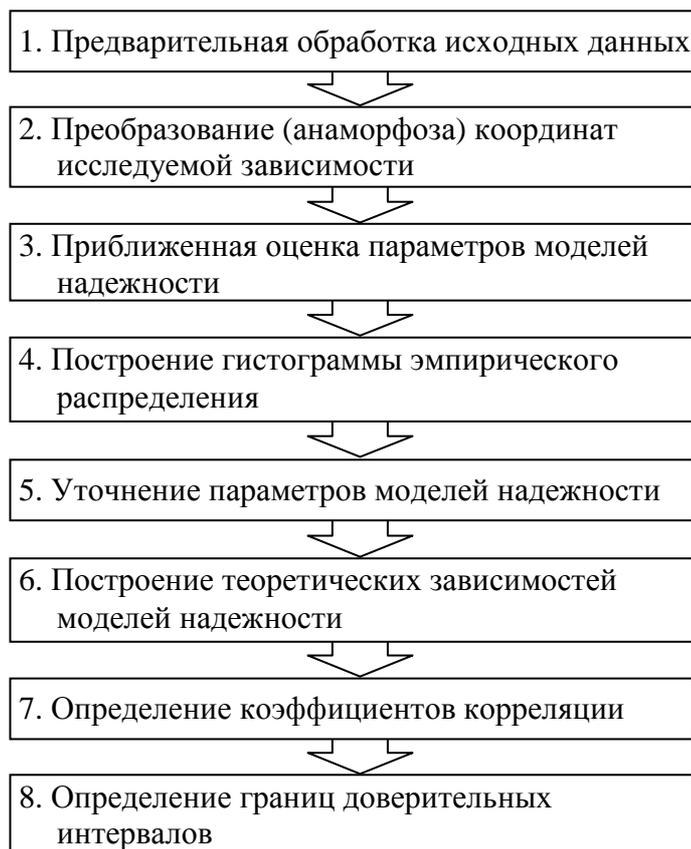


Рис. 3. Алгоритм математической модели эксплуатационной надежности АДЛ

Проведен аналитический обзор существующих программ для ЭВМ в таких источниках, как: официальный бюллетень Федеральной службы по интеллектуальной собственности и сайт Роспатента (www.fips.ru), которые являются достоверным источником информации. В результате для реализации математической модели выбран математический редактор MathCAD. Разработанная автором программа «Оценка эксплуатационной надежности технических устройств по цензурированным данным» работает следующим образом:

Блок 1. Ввод исходных данных из текстового файла с расширением *.txt, который представляет собой два столбца: первый – вектор наработок, второй – вектор индикатора, указывающего либо на наработку до отказа, либо на наработку до цензурирования. Указывается путь нахождения файла после загрузки

программы. Далее программа ранжирует вектор наработок по принципу возрастания путем перетасовки с применением оператора $sort(w)$, находит число нулей в векторе индикатора слева от первой единицы и в дальнейшем не учитывают цензурированные наработки меньше первой наработки до отказа.

Блок 2. Преобразование координат исследуемой зависимости с целью приведения ее к линейному виду с помощью функций анаморфозы:

$$y = A + B \cdot x, \quad (1)$$

где A и B – параметры модели надежности; $x = f(t)$, $y = f(P)$ – функции анаморфозы для каждой модели надежности.

Блок 3. Предварительная оценка параметров моделей надежности (Вейбулла, экспоненциальной, нормальной, логарифмически-нормальной) методом наименьших квадратов с учетом цензурированных наработок.

Блок 4. Построение гистограмм эмпирического распределения интенсивности отказов $\lambda_{emp}(t_k)$ и вероятности безотказной работы $P_{emp}(t_k)$ с использованием оператора *hist* по формулам (2) и (3), которые учитывают гистограммы, как отказов, так и цензурированных.

Эмпирическая интенсивность отказов:

$$\lambda_{emp}(t_k) = \frac{a_k}{\left(N - \sum_{k=1}^k (a_k + k_{0k}) \right) \cdot \Delta t}, \quad (2)$$

где $\lambda_{emp}(t_k)$ – интенсивность отказов на k -ом интервале; a_k – количество наработок до отказа на k -ом интервале; k_{0k} – количество наработок до цензурирования на k -ом интервале; N – количество АДЛ, работающих в начале наблюдений, Δt – ширина интервала времени.

Эмпирическая вероятность безотказной работы:

$$P_{emp}(t_k) = \prod_{k=1}^k \left(\frac{1}{1 + \lambda_{emp}(t_k)} \right). \quad (3)$$

Блок 5. Уточнение параметров моделей надежности с помощью оператора *Minerr* по условию стремления к нулю разницы опытного и теоретического распределений. Этот оператор выполняет нелинейный подбор параметров заданной функции, которая находится в наилучшем согласии с экспериментальными точками. Для этого изображен требуемый вид функции вероятности безотказной работы (ВБР) с указанием искомым параметров, и приведены их предполагаемые значения, найденные в предварительном расчете. Для определения ВБР при нормальной модели надежности использован оператор *snorm*, для определения плотности распределения наработок до отказа – оператор *dnorm*, для расчета ВБР при логнормальной модели надежности – *plnorm* и плотности распределения наработок – *dlnom*. Записано уравнение разницы опытной и теоретической функций и решено командой *Minerr* по условию ее равенства нулю, что приводит к определению искомым параметров в измененных обозначениях. По полученным параметрам определены математическое ожидание и коэффициент вариации. Для сравнительного анализа построены в одних осях гистограммы эмпирического распределений и полученные теоретические зависимости по интервалам, которые позволяют получить первое представление о согласии теории и эксперимента.

Блок 6. Построение графиков теоретических распределений $\lambda(t)$ и $P(t)$, а также плотности распределения наработок $f(t)$ по точкам.

Блок 7. Расчет коэффициента корреляции между эмпирическим и теоретическим распределением для более объективного выбора модели надежности

с помощью оператора $corr(x,y)$. Хорошему согласию распределений соответствует коэффициент корреляции со значением более 0,98. Также определена модель надежности с максимальным коэффициентом корреляции и построен корреляционный график. Результаты расчета выведены в виде результирующей матрицы, содержащей наименование моделей надежности, их параметры и коэффициент корреляции.

Блок 8. Определение границ доверительных интервалов средней наработки до отказа. При этом пользователь должен самостоятельно задать двустороннюю доверительную вероятность θ .

В результате моделирования и сформированных массивов исходных данных статоров двигателей 4АМН160SA4/16НЛБУЗ (3,55 / 0,88 кВт), 5АН160S4/16НЛБУЗ (3,55 / 0,88 кВт), 4АМН160S6/18НЛБУЗ (3,0 / 1,0 кВт), 5АН160S6/18НЛБУЗ (3,0 / 1,0 кВт) в период с 2010 г. по 2013 г. построены гистограммы эмпирических распределений и теоретические функции интенсивности отказов. Массивы получены в результате исследования групп АДЛ, имеющих различный период эксплуатации до начала наблюдений. В качестве данных использованы значения наработок до отказа и цензурированных наработок, представляющих собой календарное время эксплуатации. Причины, которые привели к цензурированию данных исследуемой выборки АДЛ: различные даты начала работы АДЛ, отсутствие информации об отказах и проведенных ремонтах до начала исследований АДЛ, существование отказов различных видов, вынужденное прекращение наблюдений из-за необходимости оценки эксплуатационной надежности АДЛ. Пример интенсивности отказов статоров АДЛ, установленных в 1986–1989 гг. при различных моделях надежности представлен на рис. 4.

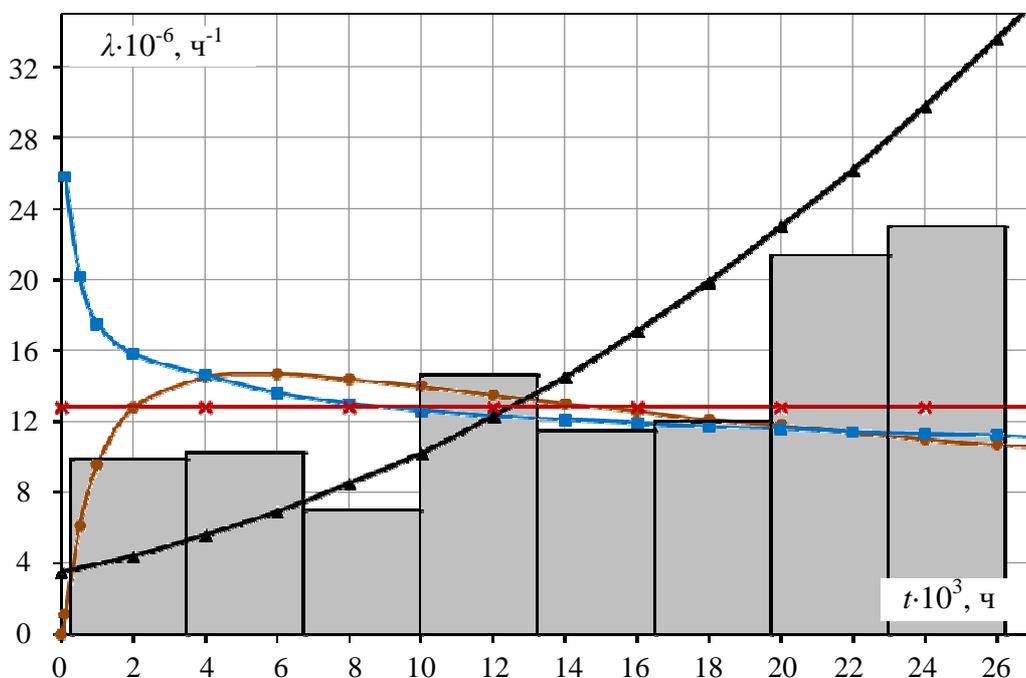


Рис. 4. Интенсивность отказов статорных обмоток АДЛ, установленных в 1986–1990 гг. при моделях надежности: ▲ – нормальной; ● – логарифмически-нормальной; × – экспоненциальной; ■ – Вейбулла

Полученные количественные показатели надежности и анализ коэффициентов корреляции позволили сделать вывод: эксплуатационная надежность групп АДЛ, установленных в 1986–1989 гг. описывается нормальной моделью надежности (период износа), установленных в 1990–1994 гг., 1995–1999 гг., 2000–2004 гг. – экспоненциальной моделью надежности (период нормальной работы), установленных в 2005–2011 гг. – моделью надежности Вейбулла (период приработки). Соответственно техническое состояние магнитопровода и изоляции статорных обмоток групп АДЛ различно и определяется длительностью эксплуатации до начала наблюдений.

В третьей главе разработана математическая модель прогнозирования эксплуатационной надежности статоров АДЛ, алгоритм которой представлен на рис. 5. С точностью достаточной для совершенствования системы ТОиР ее следует считать ММ прогнозирования АДЛ в целом.

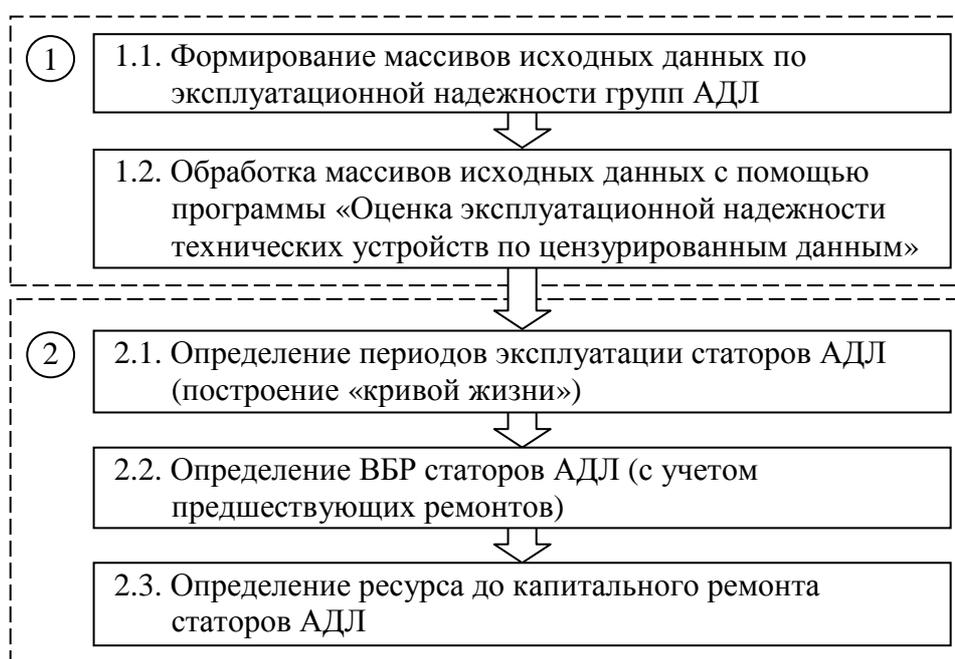


Рис. 5. Алгоритм математической модели прогнозирования эксплуатационной надежности статоров АДЛ

Первый блок ММ прогнозирования представляет собой сбор и обработку эксплуатационной информации, выполненные в главе 2. Функции интенсивности отказов статоров групп АДЛ, полученные с помощью программы «Оценка эксплуатационной надежности технических устройств по цензурированным данным» подчиняются различным законам распределения (табл. 1). Указанные в табл. 1 функции объединены в одних координатных осях, при этом впервые в практике эксплуатации получена «кривая жизни» статоров АДЛ не встречающаяся ранее в литературе (рис. 6). «Кривая жизни» составлена из пяти участков функции интенсивности отказов длительностью по три года. Недостающие интервалы между ними построены при помощи моделей надежности предыдущего интервала. От даты введения АДЛ в эксплуатацию до 6 лет (точка T_n) происходит приработка АДЛ (T_1), как показало исследование группы двигателей, установленных в 2005–2011 гг. В период приработки отказы вызваны технологическими и производственными

недостатками, а также особым режимом нагружения, который характеризуется большим количеством циклов работы и массой перевозимого груза при заселении новостройки. В результате происходит нагрев, вызванный протеканием токов перегрузки. Для предотвращения выхода из строя двигателя, срабатывают датчики температурной защиты.

Таблица 1. Функция интенсивности отказов статоров АДЛ

Период эксплуатации, лет	Период установки группы АДЛ, гг.	Модель надежности	Функция интенсивности отказов
1–6	2005–2011	Вейбулла	$\lambda_{СТ}(t) = 0,00024 \cdot 0,69729 \cdot t^{0,69729-1}$
6–11	2000–2004	Экспоненциальная	$\lambda_{СТ}(t) = 4,53 \cdot 10^{-6}$
11–16	1995–1999		$\lambda_{СТ}(t) = 5,09 \cdot 10^{-6}$
16–21	1990–1994		$\lambda_{СТ}(t) = 4,48 \cdot 10^{-6}$
От 21	1986–1989	Нормальная	$\lambda_{СТ}(t) = \frac{\sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{(t-32771)^2}{2 \cdot 16596^2}\right]}{16596 \cdot \Phi\left(\frac{t-32771}{16596 \cdot \sqrt{2}}\right)}$

Примечание: $\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-x^2) dx$ – интеграл вероятности (интеграл Лапласа)

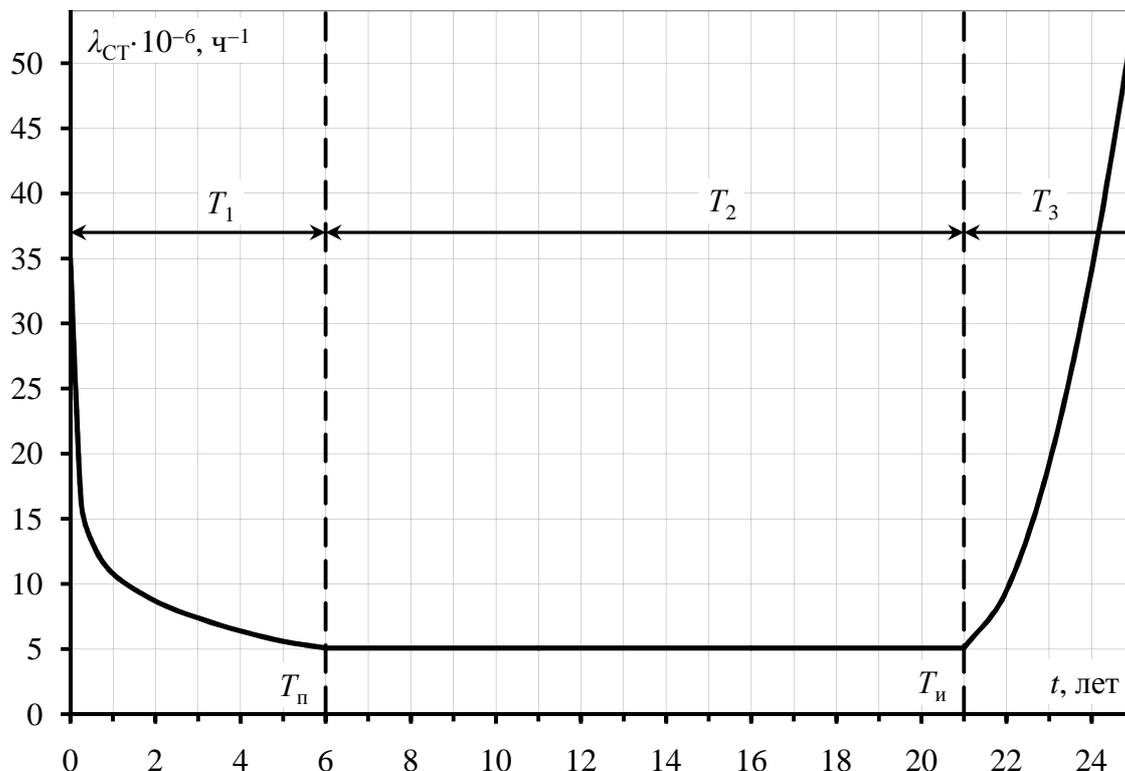


Рис. 6. «Кривая жизни» статоров АДЛ

Периодам эксплуатации 6–11, 11–16, 16–21 лет соответствует – период нормальной работы (T_2), определенный для статоров двигателей, установленных в 2000–2004, 1995–1999, 1990–1994 гг. соответственно. Отказы статоров АДЛ имеют

внезапный (случайный) характер без какой-либо определенной закономерности. После 21 года эксплуатации (точка $T_{и}$) наступает период износа, имеющий отказы возрастающей интенсивности, определенный при помощи статоров АДЛ, установленных в 1986–1989 гг. Отказы статоров связаны с необратимыми процессами, протекающими в изоляции и связывающих пропиточных составов их обмоток. В результате происходит частичное разрушение изоляции, приводящее к коротким замыканиям.

Построены функции ВБР в начале каждого периода эксплуатации, имеющие максимальное значение по причине принятого в ММ допущения (до начала наблюдений проведен текущий ремонт АДЛ), функция ВБР без применения системы ТОиР, определены $T_{ср}$. Средняя наработка до отказа в период износа представляет собой технический ресурс до капитального ремонта. Ресурс до капитального ремонта при отсутствии системы ТОиР с учетом определенных моделей надежности вычислен по следующей формуле:

$$T_{рк} = \left(\sum_{i=1}^5 \exp[-0,00024 \cdot t_i^{0,69729}] \right) \cdot \Delta t + \left(\sum_{i=6}^{10} \exp[-4,53 \cdot t_i] \right) \cdot \Delta t + \left(\sum_{i=11}^{15} \exp[-5,09 \cdot t_i] \right) \cdot \Delta t + \left(\sum_{i=16}^{17} \exp[-4,48 \cdot t_i] \right) \cdot \Delta t = 76844 \text{ ч} \quad (4)$$

Средний ресурс до капитального ремонта статоров АДЛ при отсутствии системы ТОиР составил 76844 ч, то есть 8,7 лет. Хотя их средний технический ресурс, определенный по данным эксплуатации составляет 24,7 лет. Соответственно для безотказной эксплуатации АДЛ в течение длительного периода необходима разработка эффективной системы ТОиР.

Определена вероятность безотказной работы подшипников при механическом износе и долговечность, применяемой в них смазки по методике предполагающей появление отказов по причине износа в соответствии с моделью надежности Вейбулла, а изменение технического состояния смазки в соответствии с нормальной моделью надежности.

Проведенные расчеты показали правильный выбор подшипников для нагрузок, присущих данным условиям эксплуатации. Ориентируясь на определенный срок службы смазки, определено, что подшипниковые устройства могут безотказно работать до 10 лет и более. Однако причинами остановки АДЛ в части подшипников, зафиксированными при исследовании, были износ (2,3%), шум (2,3%), разрушение (1,2%) и недостаточное количество смазки (2,3%). Соответственно произошедшие отказы стали следствием эксплуатационных факторов: нарушения режима работы, перегрузки, неправильного монтажа, нагрева, вибрации, недостаточной эффективности уплотнений, посадки с чрезмерным натягом, которые не были учтены при расчете. Двукратная перегрузка подшипников уменьшает их долговечность в 10 раз. Причинами повышенных нагрузок, является некачественная сборка при производстве на заводах-изготовителях, или при осмотрах в период текущих ремонтов. Повышенный нагрев увеличивает скорость старения смазки, а под действием вибрации выкрашивается металл на дорожках качения, вызывая абразивный износ подшипников. Таким образом, для надежной работы подшипниковых устройств необходимо проведение надлежащего технического обслуживания, результатом которого является устранение причин

ускоренного их износа и проведение диагностики, позволяющей провести своевременный вывод их из эксплуатации.

Четвертая глава посвящена совершенствованию системы организации технического обслуживания и ремонта АДЛ. Основываясь на результатах проведенных исследований, а также на анализе технических мероприятий, которые способствовали достижению современного уровня надежности АДЛ и истории их восстановления, был разработан алгоритм технического обслуживания и ремонта, предполагающий применение смешанной стратегии.

Эксплуатационную надежность АДЛ определяют два узла: статор и подшипниковые устройства. Произошедшие отказы подшипниковых устройств стали следствием эксплуатационных факторов. Следовательно, поддержание их работоспособного состояния должно осуществляться путем тщательного контроля согласно стратегии ТОиР по текущему состоянию с помощью средств диагностики. Статоры АДЛ должны обслуживаться согласно системе ППР (рис. 7) с периодичностью, приведенной в табл. 2.

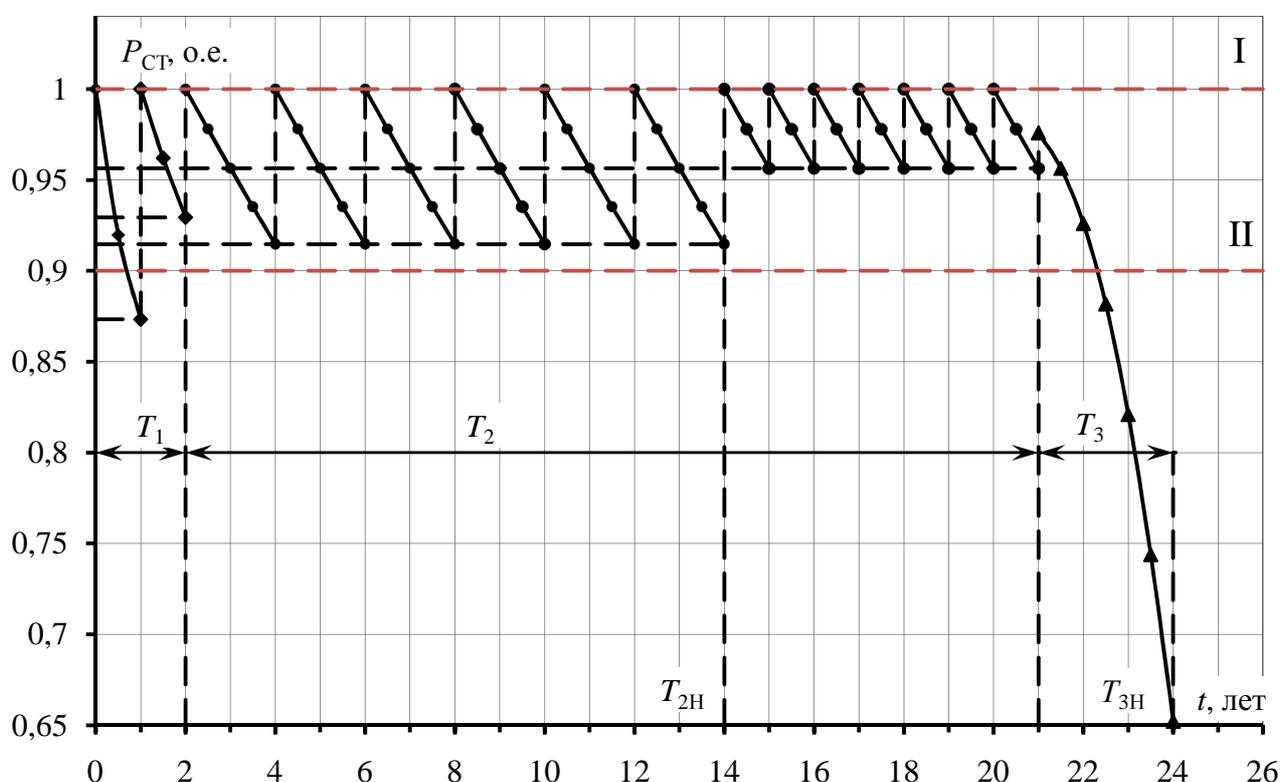


Рис. 7. Система текущего ремонта статоров АДЛ:

- ◆ – ВБР в период приработки;
- – ВБР в период нормальной эксплуатации;
- ▲ – ВБР в период износа

Таблица 2. Периодичность текущих ремонтов статоров АДЛ

Технические мероприятия	Этап эксплуатации, лет	Периодичность
Текущий ремонт	0–2	12 месяцев
	2–14	24 месяца
	14–21	12 месяцев
	21–24	6 месяцев
Капитальный ремонт	0–24	24 года

В качестве предельно-допустимого уровня ВБР системы ТООР принят, оговоренный в технических условиях $P=0,9$ (уровень II на рис. 7). То есть, при снижении ВБР до этого уровня, необходимо проведение текущего ремонта.

Периодичность текущего ремонта статоров АДЛ была определена на основе математической модели прогнозирования их эксплуатационной надежности с учетом изменения функции ВБР по законам распределения, зависящим от этапа эксплуатации и интервальных оценок средних наработок до отказа ($T_{2н}$ – нижняя граница доверительного интервала в период нормальной эксплуатации, $T_{3н}$ – в период износа). Проведение текущего ремонта статоров (длительность ремонта на рис. 7 не показана) на этапе приработки и нормальной эксплуатации восстанавливает надежность АДЛ до первоначального уровня (I), что невозможно на этапе износа. При достижении наработкой значения среднего технического ресурса (ВБР=0,5) необходимо проведение капитального ремонта, то есть полная замена либо обмоток, либо статора в целом.

Для своевременного выявления и устранения, возникших в процессе эксплуатации повреждений узлов АДЛ, а также оперативного проведения контроля качества текущего ремонта следует использовать средства диагностики. С целью определения параметра, контроль которого позволит повысить эксплуатационную надежность, АДЛ был рассмотрен как составная часть пассажирского лифта, представляющего собой единую систему, и сделан вывод о целесообразности измерения среднеквадратичного значения виброскорости. Измерения необходимо проводить: после монтажа на месте эксплуатации; во время технического обслуживания; в течение текущего ремонта до и после разборки АДЛ.

Для продления срока службы двигателей помимо установленного объема работ следует осуществлять контроль температуры АДЛ при их техническом обслуживании.

Приведенные рекомендации по совершенствованию организации технического обслуживания и ремонта позволят повысить эксплуатационную надежность АДЛ и уменьшить длительность простоя пассажирских лифтов на аварийном ремонте.

В заключении приведены основные выводы по научным и практическим результатам проведенных исследований.

В приложениях приведены акты внедрения результатов работы, эксплуатационные данные асинхронных двигателей для лифтов, листинг и свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, коды и описание аварийных ситуаций лифтов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Впервые получены фактические данные об эксплуатационной надежности асинхронных двигателей для лифтов. Исследования проводились в течение 2010–2013 гг. на примере выборки, состоящей из 446 двухскоростных АДЛ с короткозамкнутым ротором высотой оси вращения 160 мм, мощностью 3,55 / 0,88 кВт при числе пар полюсов 4 / 16 и 3,0 / 1,0 кВт при числе пар полюсов 6 / 18. Двигатели установлены в пассажирских лифтах до 400 кг в жилых домах этажностью от 8 до 17 в период с 1986 г. по 2011 г. в г. Томске.

Сформированная выборка АДЛ разбита на пять групп в зависимости от длительности эксплуатации, изучение надежности которых на первом этапе проводилось независимо друг от друга, так как их техническое состояние различно. Полученные данные являются многократно цензурированными интервалом из-за отсутствия информации до начала наблюдений, разделения отказов по видам, различных моментов ввода лифтов в эксплуатацию и прекращения наблюдений до того как все двигатели выйдут из строя.

2. Получены данные по отказам элементов лифтов и представлены в виде дерева целей. На АДЛ приходится 10% отказов лебедки, эти отказы приводят к длительному простоям пассажирских лифтов и являются наиболее дорогими по исправлению, как показал экспертный опрос. Получены данные по видам отказов АДЛ: статор – 41,8%, датчики температурной защиты, входящие состав статора – 38,4%, подшипниковые устройства – 8,1%. Для определения уровня эксплуатационной АДЛ в целом принято решение учитывать надежность статора и подшипниковых устройств, ВБР остальных узлов и деталей приравнять единице из-за незначительного количества их отказов.

3. Разработана математическая модель для оценки эксплуатационной надежности АДЛ, представляющая собой математические формулы и связи между ними. Отличительной особенностью ММ является то, что она позволяет определять количественные показатели моделей надежности (экспоненциальной, Вейбулла, нормальной, логарифмически-нормальной) с учетом не только полных наработок, но и цензурированных методом наименьших квадратов с последующим уточнением. Проверка адекватности моделей надежности в предложенной ММ проводится с помощью линейного коэффициента корреляции, представляющего собой степень согласия эмпирического и теоретического распределений.

4. Разработана программа на основе математической модели оценки эксплуатационной надежности АДЛ по цензурированным данным с помощью редактора MathCAD. Достоинством разработанной программы является оценка параметров моделей надежности по цензурированным данным, что необходимо при исследовании технического состояния высоконадежных двигателей, к которым относятся АДЛ. Программа может быть использована для оперативной оценки надежности ЭМ или их узлов по наработкам, полученным в процессе эксплуатации, при прогнозировании эксплуатационной надежности, при обосновании межремонтных периодов, а также в учебном процессе ввиду своей наглядности. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014618241.

5. Определены показатели моделей надежности для статоров групп АДЛ, имеющих различный период эксплуатации до начала их исследования. Отказы статоров вновь установленных двигателей подчиняется закону распределения Вейбулла, свидетельствуя о периоде приработки. У двигателей, относящихся к группе, эксплуатируемой более 21 года, отказы статоров возникают в соответствие с нормальным законом распределения. Между периодом приработки и износа находится период нормальной работы АДЛ, где отказы статоров подчиняются экспоненциальной модели надежности.

6. Разработана математическая модель прогнозирования эксплуатационной надежности статоров АДЛ, основанная на математической модели оценки

эксплуатационной надежности статоров АДЛ по цензурированным данным. Полученная модель позволяет определить периоды эксплуатации статоров АДЛ, определить ВБР на каждом периоде и определить ресурс до капитального ремонта АДЛ.

7. Впервые в практике эксплуатации получена «кривая жизни» статоров АДЛ не встречающаяся ранее в литературе. Вид данной кривой приводится неоднократно, но количественные значения ранее были неизвестны. Полученная зависимость наглядно показывает периоды эксплуатации статоров АДЛ: приработки, нормальной работы и износа.

Большое значение в период приработки имеет его длительность. С точностью, достаточной в дальнейшем для разработки системы ТОиР, следует считать длительность периода приработки, равной двум годам. В период нормальной эксплуатации происходят отказы обмоток АДЛ, не имеющие какой-либо определенной закономерности, интенсивность их при этом на уровне $5,0 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$. Через 21 год эксплуатации двигателей наступает период старения изоляции обмоток, имеющий отказы возрастающей интенсивности. В течение трех лет интенсивность отказов увеличивается почти в шесть раз и достигает $33 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$.

8. Построена функция вероятности безотказной работы статоров АДЛ на всех периодах их эксплуатации и определены средние наработки до отказа. В период нормального функционирования средняя наработка до отказа составляет 31,2 года и показывает только степень надежности АДЛ в этот период. Средняя наработка до отказа в период износа статоров АДЛ является их техническим ресурсом – 24,7 лет. Рассчитан средний ресурс до капитального ремонта при отсутствии системы ТОиР – 8,7 лет.

9. Определены ВБР подшипников при механическом износе и долговечность, применяемой в них смазки по стандартной методике. Примененная методика предполагает появление отказов шариковых подшипников по причине износа в соответствии с моделью надежности Вейбулла, а изменение технического состояния смазки в соответствии с нормальной моделью надежности. Определенные расчетным путем показатели надежности подшипниковых устройств на начальном этапе и на протяжении длительного периода эксплуатации показывают, что произошедшие отказы стали следствием эксплуатационных факторов, которые не были учтены при расчете. Следовательно, с точностью достаточной в дальнейшем для разработки рекомендаций ТОиР позволяют считать математическую модель прогнозирования эксплуатационной надежности статоров математической моделью прогнозирования АДЛ в целом.

10. Разработан алгоритм технического обслуживания и ремонта АДЛ, основанный на математической модели прогнозирования эксплуатационной надежности статоров АДЛ и позволяющий сочетание системы ППР (для статоров) и стратегии ТОиР по текущему состоянию (для подшипниковых устройств).

11. Определена периодичность текущего ремонта статоров АДЛ на основе математической модели прогнозирования их эксплуатационной надежности, учитывающая изменение функции ВБР по законам распределения, зависящим от этапа эксплуатации, интервальные оценки средних наработок до отказа и требуемый уровень надежности, установленный технической документацией. Для безотказного функционирования АДЛ в период приработки: (0–2) лет текущий ремонт статоров

необходимо проводить с периодичностью 1 раз в год; в течение нормальной эксплуатации: (2–14) лет – 2 раза в год, (14–21) года – 1 раз в год; в период износа: (21–24) лет – 1 раз в 6 месяцев. Капитальный ремонт должен проводиться после 24 лет эксплуатации АДЛ.

12. Разработаны рекомендации по совершенствованию системы организации технического обслуживания и ремонта АДЛ, которые предполагают применение методов вибродиагностики. Измерение среднеквадратичного значения виброскорости необходимо проводить: после монтажа на месте эксплуатации; во время технического обслуживания; в течение текущего ремонта до и после разборки АДЛ. Измерения уровней вибрации позволяют своевременно выявить и устранить, возникшие в процессе эксплуатации повреждения узлов АДЛ, а также оперативно провести контроль качества их текущего ремонта. Для продления срока службы двигателей следует также осуществлять контроль температуры АДЛ при их техническом обслуживании.

Однако формальное соблюдение приведенных рекомендаций и проведение текущего ремонта неквалифицированным персоналом может привести к снижению эксплуатационной надежности АДЛ.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. **Шпет Н.А.**, Муравлёв О.П. Исследование отказов пассажирских лифтов по данным эксплуатации // Известия Томского политехнического университета. –2013. – Т. 323, № 4 – С. 123–125.

2. **Шпет Н.А.**, Муравлёв О.П. «Кривая жизни» статорных обмоток асинхронных двигателей для лифтов. // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 325, № 4 – С. 103-110.

3. **Шпет Н.А.**, Муравлёв О.П. Прогнозирование эксплуатационной надежности и диагностика статорных обмоток двухскоростных асинхронных двигателей // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2014. – № 4 – С. 174–178.

Авторские свидетельства

4. **Шпет Н.А.**, Муравлёв О.П. Оценка эксплуатационной надежности технических устройств по цензурированным данным // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014618241. Роспатент. Москва. Бюл. № 9 (95). 13.08.2014.

Другие научные публикации по теме диссертации

5. **Шпет Н.А.** Основные требования, предъявляемые к асинхронным двигателям для лифтов // Современные техника и технологии : материалы XVII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Т. 1. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – С. 567–568.

6. **Шпет Н.А.** Анализ отказов асинхронных двигателей для лифтов в эксплуатации // Электромеханические преобразователи энергии : Материалы V Юбилейной Международной научно-технической конференции имени

Г.А. Сипайлова. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – С. 25–28.

7. **Шпет Н.А.** Выбор системы показателей надежности асинхронных двигателей для лифтов // Современные техника и технологии : материалы XVIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Т. 1. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – С. 409–410.

8. **Шпет Н.А.** Выбор метода оценки эксплуатационной надежности асинхронных двигателей для лифтов // Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования : материалы V Всероссийской научно-техн. конф. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – С. 84–86.

9. **Шпет Н.А.** Структурная модель лифта для оценки его эксплуатационной надежности // Современные техника и технологии : материалы XIX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Т. 1. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – С. 361–362.

10. **Шпет Н.А.** Модели надежности лифтовых асинхронных двигателей при эксплуатации // Электромеханические преобразователи энергии : материалы VI Международной научно-технической конференции. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – С. 54–59.

11. **Шпет Н.А.** Анализ технического обслуживания и ремонта лифтовых асинхронных двигателей // Современные техника и технологии : материалы XX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Т. 1. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – С. 281–282.

12. **Шпет Н.А.** Оценка эксплуатационной надежности технических устройств // Электронные и электромеханические системы и устройства : Тезисы докладов XIX научно-технической конференции. – Томск : АО «НПЦ «Полус», 2015. – С. 114–116.

Личный вклад автора

Публикации [5–12] выполнены без соавторов. В работах, выполненных с соавторами, вклад автора состоит в следующем: [1] построение структурной модели лифта, формирование и анализ массива эксплуатационных данных, [2] определение количественных показателей эксплуатационной надежности статоров асинхронных двигателей для лифтов и построение их «кривой жизни», [3] разработка системы текущего ремонта статорных обмоток двухскоростных асинхронных двигателей для лифтов, [4] разработка математической модели оценки эксплуатационной надежности асинхронных двигателей для лифтов по цензурированным данным, синтез программы для ЭВМ.