

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
"НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ"

Акционерное общество
"НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЦЕНТР "ПОЛЮС"

На правах рукописи

Шпет Наталья Анатольевна

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ
АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ ЛИФТОВ**

Специальность 05.09.01 – "Электромеханика и электрические аппараты"

Диссертация
на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Муравлёв Олег Павлович

Томск – 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

	С.
ВВЕДЕНИЕ	5
1. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ РАБОТ ПО НАДЕЖНОСТИ	
АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И СИСТЕМАМ ТЕХНИЧЕСКОГО	
ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА	13
1.1. Надежность асинхронных двигателей и проблема ее обеспечения.....	13
1.2. Причины появления отказов асинхронных двигателей	20
1.3. Особенности конструкции и условия эксплуатации асинхронных	
двигателей для лифтов.....	25
1.4. Методы моделирования эксплуатационной надежности	
асинхронных двигателей	33
1.5. Существующие системы технического обслуживания и	
ремонта и их задачи	39
1.6. Постановка задач исследования	46
1.7. Выводы	48
2. СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ	
НАДЕЖНОСТИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ ЛИФТОВ	53
2.1. Основное направление в изучении эксплуатационной	
надежности асинхронных двигателей для лифтов	53
2.2. Структурная модель эксплуатационной надежности лифта	60
2.3. Анализ отказов пассажирских лифтов по данным	
эксплуатации.....	71
2.4. Массив исходных данных по эксплуатационной надежности	
асинхронных двигателей для лифтов.....	77
2.5. Математическая модель оценки эксплуатационной	
надежности асинхронных двигателей для лифтов по	
цензурированным данным	86

2.6. Программная реализация математической модели эксплуатационной надежности асинхронных двигателей для лифтов.....	94
2.7. Моделирование эксплуатационной надежности статоров асинхронных двигателей для лифтов.....	101
2.8. Выводы	108
3. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ ЛИФТОВ	112
3.1. Общие сведения прогнозирования эксплуатационной надежности асинхронных двигателей для лифтов.....	112
3.2. Математическая модель прогнозирования эксплуатационной надежности статоров асинхронных двигателей для лифтов	118
3.3. Прогнозирование надежности и долговечности подшипниковых устройств асинхронных двигателей для лифтов	130
3.4. Выводы	141
4. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ ОРГАНИЗАЦИИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ ЛИФТОВ	144
4.1. Обеспечение эксплуатационной надежности асинхронных двигателей для лифтов.....	144
4.2. Определение периодичности текущего ремонта статоров асинхронных двигателей для лифтов.....	151
4.3. Рекомендации по совершенствованию системы организации технического обслуживания и ремонта асинхронных двигателей для лифтов.....	158
4.4. Выводы	163
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	165
СПИСОК ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ	170

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	171
ПРИЛОЖЕНИЯ	
1. Коды и описание аварийных ситуаций пассажирских лифтов	185
2. Статистические данные по наработке асинхронных двигателей для лифтов.....	187
3. Листинг программы для ЭВМ	195
4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ	211
5. Акты внедрения.....	212

ВВЕДЕНИЕ

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 "Полюс", 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 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.

1. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ РАБОТ ПО НАДЕЖНОСТИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И СИСТЕМАМ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА

1.1. Надежность асинхронных двигателей и проблема ее обеспечения

Наиболее используемыми в электротехнической промышленности являются асинхронные двигатели (АД), которые составляют более половины от выпускаемых электрических машин (ЭМ). Такое распространение АД получили благодаря простоте конструкции и достаточно высокой надежности.

Надежность – это способность безотказно работать с неизменными техническими характеристиками в течение заданного промежутка времени при определенных условиях эксплуатации [1].

Исследованиями в области надежности ЭМ занимались следующие ученые: Стрельбицкий Э.К., Гольдберг О.Д., Муравлев О.П., Похолков Ю.П., Вейбулл В., Р. Барлоу, Ф. Прошан, Х. Шенк, И.М. и другие [2-6].

Обеспечением надежности АД необходимо заниматься на всех этапах их жизненного цикла, то есть при проектировании, изготовлении и эксплуатации.

Проблема повышения надежности асинхронных двигателей возникла в середине XX века и обострялась по мере их совершенствования. Такая ситуация возникла в связи с тем, что на протяжении нескольких десятилетий в машиностроении существовала тенденция снижения массы машин, а соответственно и увеличения нагрузок на активные материалы, значения показателей надежности при этом учитывались мало [7, 8]. Произошло уменьшение толщины межвитковой и корпусной изоляции, при этом увеличился нагрев обмоток и, как следствие, быстрое их старение. Изоляция обмоток АД состоит из изоляционных материалов пропитанных лаком и подвергнутых термообработке. Она представляет собой жесткую конструкцию и под воздействием температуры разлагается с образованием микротрещин, которые способствуют проникновению внутрь влаги. Насыщенная влагой изоляция теряет

свои свойства, что приводит к межвитковым и корпусным замыканиям. Кроме того трещины становятся причиной разрушения изоляции при воздействии механических нагрузок и вибрации. Физические закономерности термического старения изоляции более подробно описаны в литературе [3, 9, 10].

В настоящее время при проектировании конкурентно способных АД прослеживается обратная тенденция: увеличение массы активных материалов для получения повышенных энергетических показателей. Причем увеличение в основном проводится за счет длины сердечников статора и ротора, что объясняется экономией средств на изготовлении новых штампов.

Итак, надежность АД закладывается на этапе их проектирования и неразрывно связана с решением экономических задач, поэтому проблема обеспечения надежности и оптимального проектирования является актуальной в настоящее время.

Для обеспечения надежности АД на этапе проектирования необходимо предусмотреть [11-13]:

- выбор электрических и магнитных нагрузок, которые одновременно обеспечат необходимую надежность АД определенного назначения и минимальные массогабаритные показатели;
- конструкцию узлов и средств охлаждения с учетом требований эксплуатации, но в то же время являющихся наиболее простыми;
- применение современных марок теплостойкой изоляции, обмоточных проводов и пропиточных составов;
- использование специальных защитных устройств, например, температурных датчиков, устанавливаемых в обмотки статора и подшипниковые узлы, которые предотвращают развитие аварийных ситуаций.

Кроме выше перечисленного необходимо свести к минимуму человеческий фактор, то есть осуществлять более тщательный контроль конструкторской и технологической документации, учитывать возможности производственного оборудования и квалификацию рабочих каждого конкретного промышленного

предприятия. А также учитывать различные критерии оптимальности проектирования [6].

На этапе изготовления АД для обеспечения заданной надежности наиболее важным фактором является технологическая дисциплина [14]. Наибольшее количество дефектов двигателей обнаруживается именно по этой причине. К основным недостаткам производства относятся: изношенность инструмента и оборудования; низкая квалификация рабочих; несоблюдение режимов обработки деталей и технологии сборки; замены сортности материалов; низкое качество контроля по операциям. Повышения технологической надежности АД можно достигнуть, осуществляя входной контроль физических свойств материалов и качество покупных комплектующих изделий, отбраковывая несоответствующие нормативно-технической документации; повышая культуру производства и проводя приемо-сдаточные испытания двигателей [6].

В настоящее время при рыночных условиях хозяйствования наибольшее внимание уделяется эксплуатационной надежности (ЭН) АД, так как оптимальная система текущего обслуживания и ремонта позволяет значительно сэкономить финансовые ресурсы предприятий их эксплуатирующих [1, 6].

На этапе проектирования надежность АД определяется расчетным путем по формулам теории надежности [6, 15] и состоит из надежностей узлов, в основном обмоток статора, ротора и подшипниковых устройств. Вероятности безотказной работы (ВБР) обмоток рассчитываются по методикам О.Д. Гольдберга и Б.Н. Ванеева, Э.К. Стрельбицкого и Ю.П. Похолкова [3, 6, 16]. Определение надежности подшипниковых устройств при механическом износе и долговечности смазки рекомендуется проводить по стандартным методикам [17]. Аналитические методы обладают ограниченной достоверностью в виду своей трудоемкости. Для их упрощения необходимостью является учет ограниченного количества физических процессов и введение допущений, что снижает точность результатов [15, 18]. Наиболее перспективным подходом оценки надежности объектов на этапе проектирования считается имитационное моделирование, которое позволяет повысить достоверность результатов при помощи учета

динамики внутренних и внешних факторов [19]. После изготовления АД возникает возможность определения количественных показателей надежности при лабораторных ускоренных испытаниях, которые проводятся по специально разработанным методикам [20]. Недостатком проведения ускоренных испытаний является изготовление опытных образцов двигателей, которые не подлежат поставке заказчику, что приводит к дополнительным затратам. Поэтому испытания в основном проводят только крупные предприятия-изготовители, остальные ограничиваются теоретическими расчетами. Высокая достоверность и объективность информации о надежности обеспечивается наблюдением за серийными образцами АД непосредственно в определенных условиях эксплуатации, учитывающих нагрузочные режимы, климатические воздействия и особенности технического обслуживания, которые невозможно воспроизвести в условиях лаборатории. Между тем при использовании этого метода сбора информации возникают трудности:

- длительный период для наблюдений за АД, так как они являются высоконадежными и невозможно получение достаточного количества их отказов за небольшой промежуток времени;

- недостаточное количество контрольно-измерительной аппаратуры и квалифицированного обслуживающего персонала, способного качественно вести учет информации об отказах и результатах дефектации АД;

- трудоемкость сбора информации об объектах исследования на различных предприятиях либо территориально удаленных друг от друга.

Несмотря на перечисленные трудности с помощью эксплуатационных наблюдений получают основную информацию об отказах АД, что позволяет решить следующие задачи:

- выявление наиболее слабых узлов и деталей, которыми определяется надежность АД в целом и причин возникновения их отказов;

- установление закономерности изменения надежности узлов АД под воздействием тех или иных условий окружающей среды;

- выявление недостатков проектирования, изготовления и эксплуатации;

– уточнение показателей надежности, установленных в нормативно-технической документации на конкретный тип АД.

Решение отмеченных задач позволяет разработать рекомендации для повышения надежности АД на всех стадиях их жизненного цикла.

Для совершенствования системы текущего обслуживания и ремонта значительную роль играет прогнозирование технического состояния АД, которое также невозможно осуществить, не имея достаточной эксплуатационной информации [15, 21-23]. Надежность электрических машин сочетает в себе такие свойства как безотказность, долговечность и ремонтпригодность. Поэтому для обеспечения и повышения надежности необходимо прогнозирование закономерностей их изменения во времени.

Вопросы прогнозирования технических объектов в настоящее время становятся очень актуальными. Они имеют тесную связь с вопросами теории надежности и технической диагностики [24]. Прогнозирование нацелено на предотвращение отказов объектов на основе определения их технического состояния на некоторое время вперед и своевременного проведения технических мероприятий. Главным инструментом прогнозирования является техническая диагностика, позволяющая находить дефекты на ранних стадиях их развития. Особенное значение прогнозирование имеет при эксплуатации высоконадежных АД, так как здесь нет возможности для ориентирования на произошедшие отказы. Кроме того создание наиболее подходящей системы обслуживания и ремонта должно проводиться для каждого конкретного типа АД эксплуатируемых в одинаковых условиях.

Решение вопросов прогнозирования невозможно без определения количественных показателей надежности с помощью различных методов теории надежности [25]. При сборе статистической информации об отказах исследуется определенная выборка АД. Классическая теория надежности позволяет определить показатели только при условии, что все двигатели выборки отказали, для этого требуется достаточно большой промежуток времени как при эксплуатационных наблюдениях, так и при лабораторных испытаниях [15, 18].

При необходимости оперативной оценки их надежности, когда требуется прекращение наблюдений или испытаний, а также при исследовании высоконадежных АД с малым количеством отказов возникает специфическая выборка, состоящая из отказавших и не отказавших двигателей, которая носит название цензурированной [26-29]. 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.

Резюмируя, отметим:

1. Проблема обеспечения надежности асинхронных двигателей является актуальной на современном этапе развития электромеханики. Значительное время существовала тенденция снижения массы активных материалов, экономии обмоточного провода и утончения пазовой изоляции, что привело к повышенному нагреву обмоток. Наиболее новым является направление по созданию энергосберегающих АД, отличающихся повышенным коэффициентом полезного действия и повышенной надежностью. Затраты при изготовлении таких двигателей будут возмещены энергосбережением и минимальным количеством затрат на текущее обслуживание и ремонт. Тем не менее, повышением надежности АД необходимо заниматься на всех этапах их жизненного цикла. Первоначальный уровень надежности закладывается на этапе проектирования двигателей, обеспечивается качественным изготовлением и поддерживается правильной эксплуатацией.

2. Наибольшее внимание в настоящее время стало уделяться эксплуатационной надежности, особенно АД находящихся на этапе близком к выработке своего ресурса. Предотвращением отказов занимается теория прогнозирования технического состояния объектов, неразрывно связанная с теорией надежности. Знание количественных показателей надежности на

некоторый промежуток времени вперед дает возможность обоснованного планирования срока и объема технических мероприятий поддерживающих работоспособное состояние АД. Обнаружение дефектов узлов двигателей на ранней стадии их развития позволяет проводить техническая диагностика.

3. Исследование отказов АДЛ, имеющих малое количество невозможно без применения методик расчета по цензурированным выборкам, состоящим из отказавших и не отказавших двигателей. Такие выборки предполагают специфический подход к определению количественных показателей надежности. Современное развитие компьютерной техники дает возможность разработки новых и совершенствованию существующих методик применительно к каждому конкретному типу АД.

1.2. Причины появления отказов асинхронных двигателей

Для оценки надежности АД большое значение имеет определение причин появления отказов. В соответствии с ГОСТ, отказ – это нарушение работоспособности объекта, то есть состояние, при котором какой-либо из параметров не соответствует установленному к нему требованию в нормативно-технической документации [30]. Зная причины возникновения отказов можно более точно нормировать показатели надежности, определять влияние отдельных узлов на надежность двигателя в целом, подготовить материально-техническую базу для оперативного устранения возникших неполадок, более эффективно проводить диагностику технического состояния, планировать сроки и объемы технического обслуживания и ремонта. Основным источником такой информации является дефектация на местах эксплуатации АД при проведении текущих ремонтов и ремонтных предприятиях при проведении капитальных ремонтов.

Отказы асинхронных двигателей возникают под воздействием различных факторов на их узлы и детали, которые разделяются на механические и электрические. К механическим факторам можно отнести недостатки изготовления и неточности, допущенные при сборке, которые становятся причиной вибрации двигателей, приводя к отказам двигателей.

Механические факторы вызывают:

- деформацию вала, приводящую к эксцентриситету ротора;
- поломку вала и крыльчатки;
- износ подшипников;
- ослабление крепления листов сердечника ротора и статора;
- ослабление крепления статора к станине.

Кроме того к перечисленным отказам приводит несимметрия питающей сети. Около 2 % приходится на долю отказов, связанных с перегрузкой на валу [31]. Такие отказы приводят к еще большей вибрации двигателей и могут стать причиной появления микротрещин в системе изоляции обмотки статора и, как следствие, к ее увлажнению, снижению сопротивления и межвитковому

замыканию. Ослабление крепления листов вызывает разрушение межлистовой изоляции, то есть нагрев участков сердечника, либо его в целом [1].

Отказы, произошедшие по причине электрических факторов в литературе [31] делятся на три типа: по напряжению, по току, по сопротивлению.

Отказы по напряжению (сетевые) связаны с изменением напряжения в сети, обрывом фаз и замыканием одной из питающих фаз на другую, на их долю приходится 80 % отказов двигателей [31]:

- при повышении напряжения сети – возрастает ток статора;
- при обрыве питающего кабеля и соединении обмоток двигателя в звезду, напряжение в одной фазе отсутствует, а в двух других составляет половину от линейного напряжения;
- при обрыве кабеля и замыкании его на фазу двигателя, в одной из фаз напряжение соответствует номинальному, а на две другие фазы подается одно и тоже фазное напряжение.

Указанные причины (увеличенный ток статора и несимметрия напряжения) приводят к повышенному нагреву обмотки статора, и, как следствие, к ускоренному старению изоляции.

Отказы по току (токовые), вызванные протеканием в обмотках статора или ротора токов перегрузки или короткого замыкания.

Такие токи возникают вследствие обрыва проводников, межвиткового и межфазного замыкания обмоток, нарушения паяных или сварных контактов в обмотках, приводят к пробое изоляции в результате чрезмерного нагрева.

Отказы по сопротивлению, то есть отказы, связанные с недопустимым снижением сопротивления изоляции обмоток, по причине их загрязнения, увлажнения, а также старения.

В настоящее время разработано и эксплуатируется большое количество серий АД, имеющих различное назначение: для башенных кранов, привода лифтов, рольганговые, взрывозащищенные, общепромышленного назначения и другие. Поэтому воздействие на них температуры окружающей среды, влажности, специфических сред, вибрации и других факторов различно. Внутри каждой

серии двигатели различаются по мощности, частоте вращения и монтажному исполнению, что также влияет на распределение отказов по узлам. В существующей литературе встречается информация только по некоторым отраслям промышленности, полная картина отсутствует [3, 6, 26, 32]. Исследованием надежности ЭМ и систематизацией их отказов начали заниматься после 60-х годов 20 века. Основные результаты были получены при отработке конструкции, технологии изготовления, а также при разработке методов испытаний. Полученная информация достаточно разнородна.

Л.Н. Кузнецовым опубликованы работы по исследованию надежности АД общепромышленного назначения [1]. Автор утверждает, что в (85-95) % отказы АД происходят по причине выхода из строя обмоток статора. Причем на долю межвитковых замыканий приходится 93 % отказов, пробой междуфазовой изоляции – 5 % и пробой изоляции в пазах – 2 %. Отказы подшипниковых устройств составляют всего (5-8) %.

В литературе [33] причиной большинства отказов АД (15-35) % авторы называют неправильное их применение и недостатки, присущие эксплуатации (35-50) %. К недостаткам конструкции и технологии производства они относят примерно (30-35) % отказов и лишь (10-12) % АД выходят из строя из-за старения изоляции и износа деталей.

Наиболее новые сведения, в части отказов низковольтных двигателей приведены в литературе [31] на основе опроса. Определяющим фактором является перегрузка АД и перегрев обмотки статора (31 %). По причине межвиткового замыкания выходят из строя 15 % двигателей. Механические повреждения обмоток статора или изоляции составляют 11 % отказов, а обрыв фазы – 8 %. По сравнению с более ранними исследованиями увеличилось количество отказов по причине воздействия механических факторов:

- повреждение подшипников – 12 %;
- обрыв стержней в короткозамкнутой клетке ротора – 5 %;
- неравномерный воздушный зазор – 9 %;
- ослабление крепления статора или обмоток – 4 %;

- несоосность валов – 2 %;
- дисбаланс ротора – 3 %.

Общепромышленные двигатели были исследованы на примере асинхронных двигателей, установленных в оборудовании АК "АЛРОСА" с 2000 г. по 2007 г. [26, 27, 34] в большом диапазоне мощностей, частотой вращения от 750 до 3000 об/мин. Анализ надежности показал, что наиболее часто отказывают АД с большей частотой вращения. Например, двигатели, имеющие скорость 750 об/мин., выходили из строя в 9 % случаев, а со скоростью 1000-3000 об/мин. – в (24-35) %. Большинство отказов (68,1 %) носят эксплуатационный характер, остальные варьируют в пределах (4,6-15,3) %. Наиболее интересными можно назвать исследования приспособленности различных серий АД к условиям алмазодобывающего комплекса. Так двигатели общепромышленного назначения серии АО показали большую надежность. Дальнейшее совершенствование эксплуатационной надежности шло по пути снижения активных и конструктивных материалов, поэтому серия 4А и более поздняя серия 5А показали уже большую долю отказов. Крановые двигатели с короткозамкнутым ротором серии МТКФ, фазным ротором серий МТФ и МТН, взрывозащищенные серий ВПР, ВАО с точки зрения эксплуатации в данных условиях имеют низкий уровень надежности. Двигатели серий ДАФЗ и СДМ оказались наименее приспособленными к технологическим режимам алмазодобывающей промышленности. Причинами отказов АД послужило, в основном, разрушение изоляции статора и ротора обмоток, недопустимое снижение сопротивления увлажненной изоляции, а также высокий уровень вибрации и уровень технического обслуживания.

Большое количество работ посвящено взрывозащищенным двигателям, как наиболее ответственному электрооборудованию [6]. Исследования показали, что взрывозащищенные двигатели, так же как и двигатели общепромышленного назначения выходят из строя по причине отказов статорных обмоток (60-80) %. Даже не смотря на то, что они проектируются более надежными. Особое внимание при разработке обмоток уделяется не столько температуре нагрева,

сколько скорости ее нарастания. Итак, (50-70) % – это межвитковые замыкания, и по (3-15) % – пробой межфазной и пазовой изоляции [6]. Снижение сопротивления изоляции было зафиксировано в (3-4) % случаев отказов АД. Подшипниковые устройства отказали в (5-20) % случаев.

Исследования в области надежности крановых АД в период с 2005-2009 годы на предприятии ООО "Юргинский машиностроительный завод", показали следующее распределение отказов по основным узлам [35]:

- обмотки статора – (66-70) %;
- обмоток ротора – (29-31) %;
- подшипников – (1-3) %.

При этом в условиях повышенной температуры окружающей среды и при наличии агрессивных сред, количество отказов обмоток статора и ротора возрастает, а подшипниковых устройств – уменьшается.

Подводя итоги, можно сказать:

1. Отказы АД возникают под воздействием механических и электрических факторов на их узлы и детали. К механическим факторам относятся недостатки изготовления и сборки. Отказы, произошедшие по причине электрических факторов, делятся на три типа: по напряжению, по току и по сопротивлению.

2. Анализ отказов АД общепромышленного назначения крановых и взрывозащищенных, позволил выявить наиболее аварийные узлы и детали. Распределение отказов зависит от назначения двигателей и варьируется в зависимости от частоты вращения, мощности и условий окружающей среды. Причем АД, эффективно эксплуатируемые в одних отраслях народного хозяйства, показывают низкую эксплуатационную надежность в других отраслях. Поэтому следует сделать вывод, что для изучения надежности лифтовых асинхронных двигателей необходимы дополнительные исследования.

3. В последнее время увеличилось количество публикаций в области надежности по причине того, что процесс проектирования и внедрения новых серий АД является длительным и для повышения надежности уже существующих машин целесообразно проводить исследование их эксплуатационной надежности.

1.3. Особенности конструкции и условия эксплуатации асинхронных двигателей для лифтов

Роль пассажирского лифта в современном мире непрерывно возрастает в связи с тем, что прослеживается тенденция повышения этажности зданий. Наиболее массово лифты стали вводиться в эксплуатацию в 80-е годы прошлого века. По различным источникам в настоящее время их насчитывается около 500 тысяч. При этом непременно лифты должны быть комфортабельными и надежными. Лифт состоит из большого количества узлов и деталей, которые обеспечивают его надежность и работоспособность. Отказ любого из них ведет к вынужденному простоя лифта, а соответственно, финансовым затратам эксплуатирующих организаций. Одним из таких элементов и является асинхронный двигатель.

Для обеспечения и повышения эксплуатационной надежности асинхронных двигателей для лифтов, необходимо четко представлять особенности конструкции и условия, в которых они эксплуатируются.

Все лифты вне зависимости от количества этажей здания работают в циклическом режиме, состоящем из разгона кабины, затем ее движения и при достижении необходимого этажа торможения. Количество и длительность таких циклов зависит от этажности и назначения здания, в котором установлен лифт (общественное здание, жилой дом), количества людей, использующих его, а также количества параллельно работающих лифтов в здании. В табл. 1.1 представлены результаты исследований показателей режимов работы лифта [36].

Таблица 1.1. Машинное время и число включений (циклов) в сутки (в год) пассажирских лифтов в зависимости от этажности дома.

Этажность дома	Время работы в сутки, час	Число включений в сутки
4 – 6	2,5 – 3	350 – 370
7 – 9	3 – 4	371 – 550
10 – 15	4 – 5	551 – 860
16 – 24	5,5 – 7	861 – 3000

Также от этажности зданий зависят и режимы нагружения, то есть количество пассажиров и груза, одновременно находящихся в лифте. Наблюдения показали, что в 5-9 этажных зданиях – это 1-2 человека, в 14-22 этажных – 2-4 человека [37]. Соответственно, с увеличением количества этажей здания, установленные в них лифты, эксплуатируются в наиболее нагруженном режиме.

Из вышесказанного следует, что режимы работы двигателей, установленных в различных зданиях, также будут различными.

С целью оптимальной эксплуатации было разработано большое количество типоразмеров асинхронных двигателей, применяемых в приводе лифтов, имеющих скорость передвижения 0,25-1,6 м/с и грузоподъемность 240-500 кг [38]. Кроме того лифтовые асинхронные двигатели разделяются на двухскоростные с независимыми обмотками статора и односкоростные, предназначенные для регулирования их частоты вращения при помощи преобразователя частоты. Наличие преобразователя приводит к значительному удорожанию привода, что является экономически неоправданным в жилых домах. Частотно-регулируемый привод целесообразно применять в больницах, где требуется высокая точность остановки кабины на этажах, а также в домах от 12 до 40 этажей и выше и в административных зданиях [39, 40].

Данные, представленные в табл. 1.1 наглядно показывают, что число включений и время работы двигателей, даже для однотипных лифтов, установленных в зданиях одинаковой этажности, изменяются в широких пределах, что усложняет практический выбор асинхронных двигателей. Характеристики выбранного двигателя применяются при проектировании, как привода, так и лифта в целом.

Отличительной особенностью двухскоростных АДЛ от других серий асинхронных двигателей является большой пусковой момент, который должен превышать момент сопротивления кабины в состоянии покоя, и обеспечиваемый в большой степени повышенным сопротивлением клетки ротора.

Грамотный выбор АДЛ в части полезной мощности, номинальной частоты вращения, пускового и номинального моментов является одним из этапов обеспечения надежной работы пассажирского лифта [40-42].

Целью нашего исследования является изучение эксплуатационной надежности уже установленных в пассажирских лифтах двигателей, поэтому нет необходимости в выборе их характеристик. Следовательно, проведем обзор приводов используемых в лифтах грузоподъемностью до 400 кг жилых домов этажностью от 8 до 17. Это приводы, оборудованные асинхронными двухскоростными двигателями, имеющими малошумное исполнение. Уровень шума таких двигателей задан в технической документации для номинального и переходных режимов работы. Среднеквадратичные значения вибрационной скорости асинхронных двигателей для лифтов габаритов 160, 180 мм не превышает 1,8 мм/с, асинхронных двигателей для лифтов габаритов 200, 225 мм - 2,8 мм/с.

Виды климатического исполнения АДЛ – УЗ, ТЗ и УХЛ4 по ГОСТ [43], краткая характеристика которых приведена в табл. 1.2.

Таблица 1.2. Характеристика климатических исполнений АДЛ

Вид климатического исполнения	УЗ	ТЗ	УХЛ4
Макроклиматический район	Умеренный климат	Тропический климат	Умеренный и холодный климат
Категория размещения	В нерегулярно отапливаемых помещениях	В нерегулярно отапливаемых помещениях	В помещениях с частично кондиционированным воздухом, а также в лабораторных и капитальных жилых помещениях
Верхняя рабочая температура	+ 45 °С	+ 60° С	+ 40 °С
Нижняя рабочая температура	– 50 °С	– 10 °С	+ 1 °С
Максимальная относительная влажность	98 % при 25 °С	98 % при 35 °С	80 % при 25 °С

Асинхронные двигатели для лифтов изготавливаются защищенными от твердых тел размером более 50 мм и не имеют специальной защиты от воды (IP10

по ГОСТ [44]), по способу охлаждения могут быть с самовентиляцией, охлаждаемые вентилятором, расположенным на валу (IC01 по ГОСТ [45]) либо иметь независимую вентиляцию. На рис. 1.1 приведен общий вид асинхронного двигателя для лифтов.

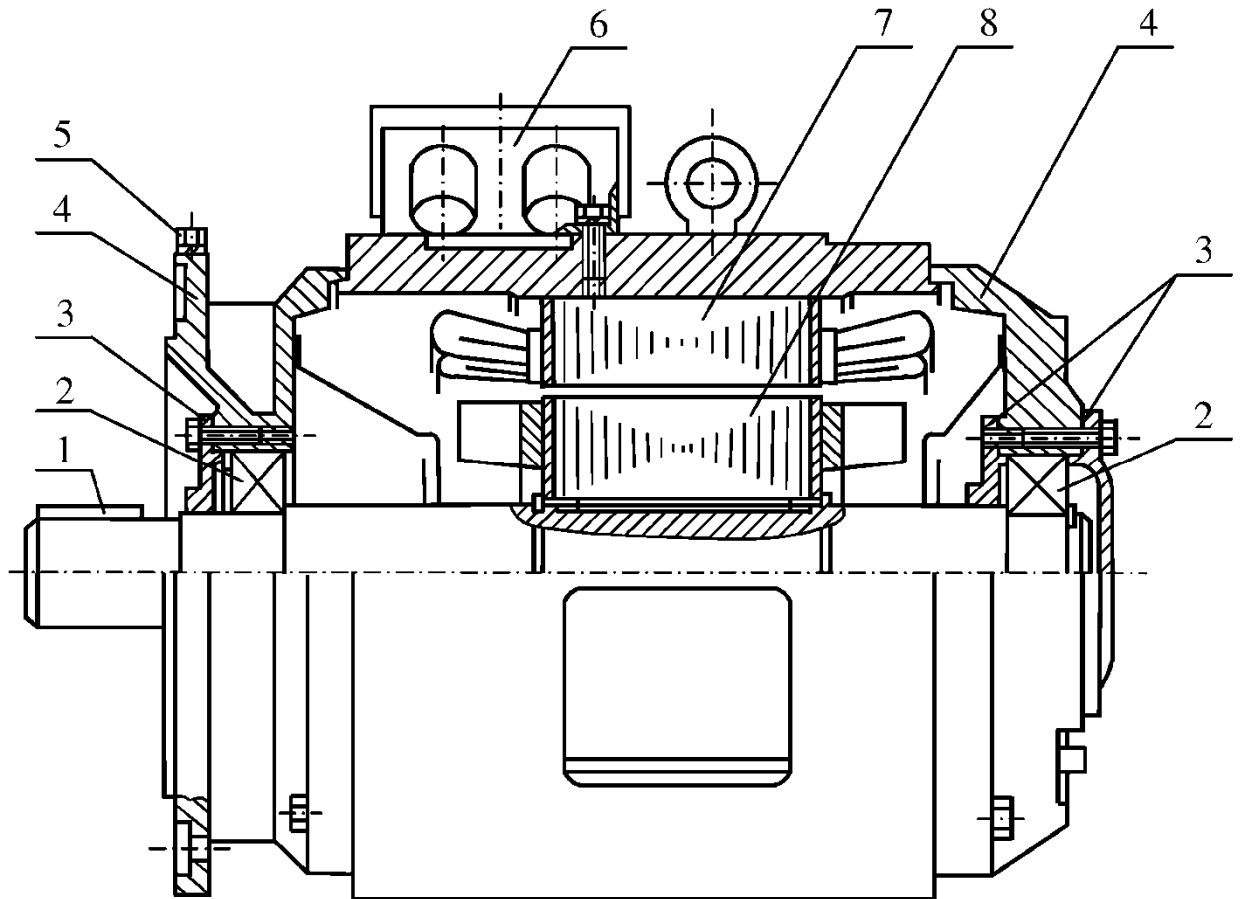


Рис. 1.1. Общий вид АДЛ: 1 – шпонка; 2 – подшипники; 3 – крышки подшипника; 4 – щиты подшипниковые; 5 – болт заземления; 6 – вводное устройство; 7 – статор; 8 – ротор.

По предварительному заказу АДЛ изготавливаются на различные стандартные напряжения, в том числе и на 380 В.

В сердечник статора двигателей уложены две независимые трехфазные обмотки из круглого эмалированного провода, позволяющие АДЛ работать с различными скоростями ротора. Обмотка большой скорости имеет число пар полюсов ($2p$) в 3 ($2p = 6/18$), 4 ($2p = 4/16$, $2p = 6/24$) или 6 ($2p = 4/24$) раз меньше, чем у обмотки малой скорости. Выводные концы соединенных в "звезду" фаз

обмоток выведены в коробку выводов и закреплены на клеммной панели. В две фазы обмоток встраиваются датчики температурной защиты (ДТЗ), предназначенные для отключения двигателя при повышении температуры его обмоток до 145°C , при независимой вентиляции в третью фазу встраиваются датчики включения вентилятора с температурой срабатывания 115°C (рис. 1.2), так как изоляционные материалы обмоток класса нагревостойкости "F", допускающие температуру нагрева до 155°C по ГОСТ [46].

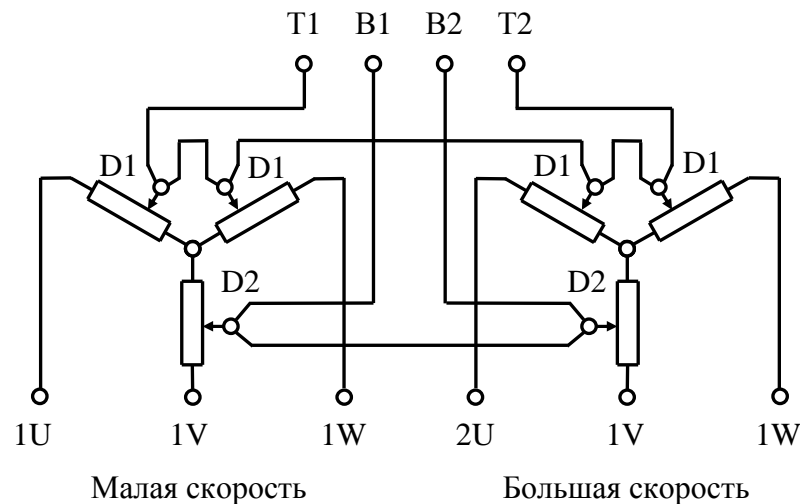


Рис. 1.2. Схема расположения датчиков температурной защиты в обмотке статора АДЛ.

Ротор АДЛ имеет короткозамкнутую обмотку, выполненную литой из алюминиевого сплава, имеющего повышенное сопротивление, так как к АДЛ предъявляются повышенные требования к пусковому моменту.

АДЛ эксплуатируются в периодическом повторно-кратковременном режиме с частыми пусками и электромагнитным торможением (S5) [49]. Рассмотрим один цикл работы двигателя, основываясь на схему привода пассажирского лифта, представленную на рис. 1.3. При пуске привода наверх включаются контакторы *KM1* – "вверх" и *KM3* – "большая скорость" с помощью логических блоков *A1* и *A2*, подается напряжение на двигатель *M*. Двигатель разгоняется до большой скорости, что отражено на участке *D* циклограммы (рис. 1.4).

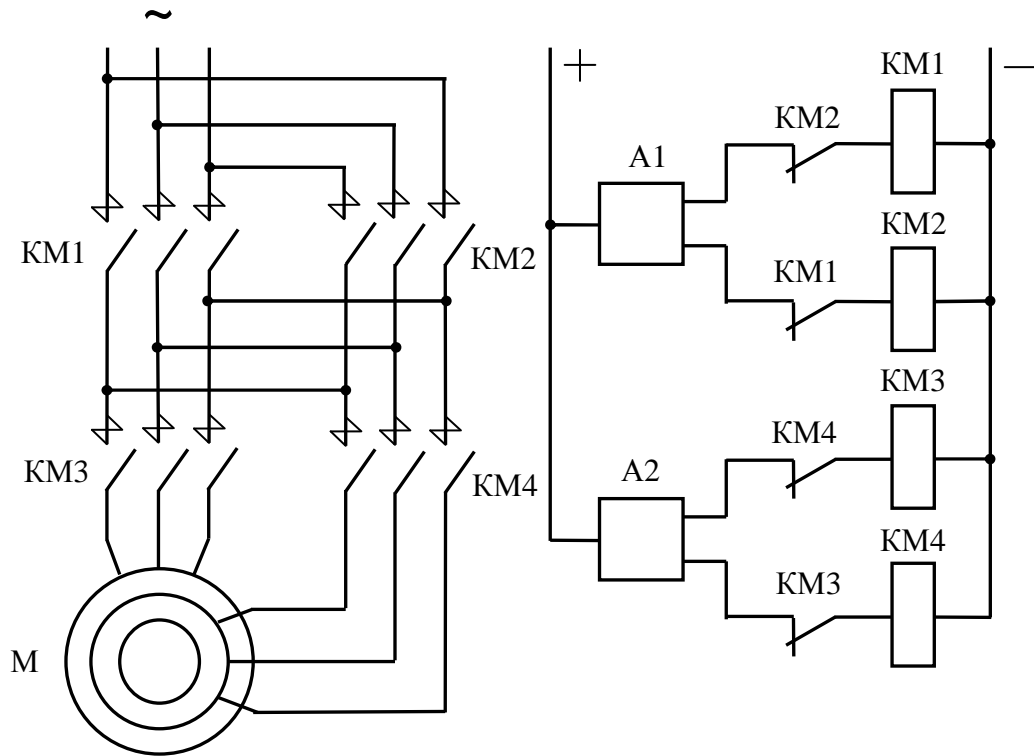


Рис. 1.3. Схема привода пассажирского лифта.

То же происходит при пуске привода вниз, только вместо контактора *KM1* в работе участвует контактор "вниз" *KM2*, изменяя чередование фаз питающего напряжения. Очевидно, что узел *A1* в зависимости от взаимного положения кабины и этажа вызова определяет направление вращения двигателя. Работа двигателя на большой скорости представлена отрезком N_B на циклограмме. При подходе кабины к необходимому этажу контактор *KM3* отключается и с помощью логического блока *A2* включается контактор *KM4* и двигатель *M* начинает работу на малой скорости. При этом происходит генераторное торможение (отрезок *F* на циклограмме). Работа на малой скорости обозначена отрезком N_M (рис. 1.4). Допустимое число циклов для двигателей с самовентиляцией – 120÷150 в час и для двигателей с независимой вентиляцией – 200 в час. Продолжительность включения на большой скорости составляет 40÷60%, на малой – 12÷15%.

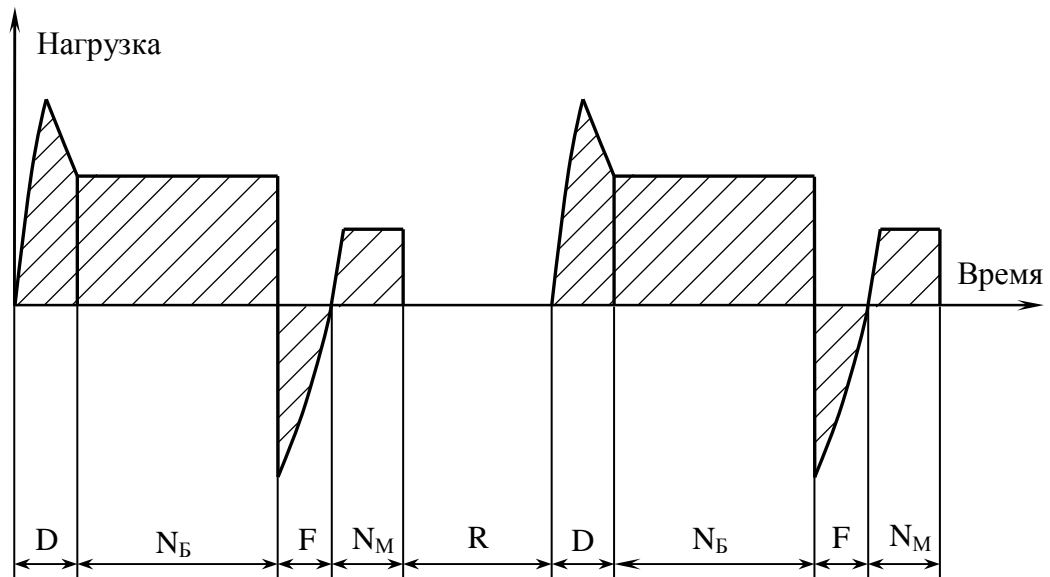


Рис. 1.4. Циклограмма работы АДЛ

По способу монтажа все двигатели могут изготавливаться в исполнении IM3001 и IM3002 по ГОСТ [47], то есть без лап, с фланцем на одном подшипниковых щите, с одним или двумя концами вала.

Показатели надежности устанавливаются в технических условиях на конкретный тип двигателей [48, 49]. Расчетные показатели для асинхронных двигателей 4АМН160НЛБ и 4АМН180НЛБ изготавливаемых Ярославским электромашиностроительным заводом приведены в табл. 1.3 [49]. Расчетные показатели для асинхронных двигателей 5АМН160НЛБ и 5АМН180НЛБ изготавливаемых Владимирским электромоторным заводом приведены в табл. 1.4 [48].

Таблица 1.3. Показатели надежности и долговечности двигателей 4АМН160НЛБ и 4АМН180НЛБ

Показатель	Значение
Вероятность безотказной работы	0,9 за 10000 часов в номинальном режиме работы
Средний срок службы до капитального ремонта	8 лет
Средний ресурс до капитального ремонта	20000 часов
Средний срок службы	Не менее 15 лет при общей наработке 40000 часов
Расчетная долговечность подшипников	12000 часов

Таблица 1.4. Показатели надежности и долговечности двигателей 5AMH160HЛБ и 5AMH180HЛБ

Показатель	Значение
Средний ресурс до капитального ремонта	Не менее 24000 часов
Средняя наработка на отказ	Не менее 18000 часов

Подводя итоги, можно отметить:

1. Для эксплуатирования лифтов в широком диапазоне грузоподъемности разработано огромное количество типоразмеров лифтовых двигателей, отличающихся как электромеханическими характеристиками, так и конструкцией. В результате анализа было определено, что в жилых зданиях в настоящее время применяются двухскоростные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором. В более ответственных зданиях с повышенными требованиями к точности остановки кабины, а также в многоэтажных и административных зданиях рекомендуется применять двигатели, управляемые с помощью частотных преобразователей.

2. Огромное значение в обеспечении надежности на начальном этапе эксплуатации зависит от грамотного выбора характеристик АДЛ, к которым относятся номинальные мощность и скорость вращения, пусковой и номинальный моменты, используемые в дальнейшем для проектирования привода лебедки лифта.

3. 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.

4. Расчетные показатели надежности устанавливаются в технических условиях на конкретный типоразмер АДЛ.

1.4. Методы моделирования эксплуатационной надежности асинхронных двигателей

В настоящее время для оценки параметров надежности любых технических систем существует множество методов, которые подразделяются на три направления: вероятностно-статистические, физико-статистические, структурные [30, 50-52]. Асинхронные двигатели представляются системой, состоящей из узлов и деталей, поэтому перечисленные методы также можно использовать для анализа их надежности. Причем точность оценки количественных показателей зависит от корректного выбора метода [53].

Вероятностно-статистические методы моделирования предусматривают использование математической статистики и теории вероятности. Они основаны на изучении статистической информации об отказах асинхронных двигателей, предусматривают ее сбор и обработку. Далее проводится аппроксимация статистики отказов и выбирается наиболее адекватная модель надежности [1]. При этом физические состояния узлов и деталей двигателей не учитываются, фиксируется только факт отказа. Кроме того исследования должны проводиться только при помощи наблюдений за асинхронными двигателями, имеющими одинаковое назначение, эксплуатирующихся в одинаковых климатических условиях, имеющих однотипную конструкцию, электромеханические характеристики и похожую систему технического обслуживания. Эти методы имеют один существенный недостаток – требуют значительного времени для эксплуатационных наблюдений. В целях экономии времени были разработаны ускоренные испытания [54-57]. Асинхронные двигатели испытываются при повышенных нагрузках, а затем, используя формулы пересчета, определяется техническое состояние деталей в условиях реальной эксплуатации.

Первые работы в области вероятностно-статистических методов были проведены Р. Хевилендом и В. Вейбуллом. Позднее ими занимались ученые: В.Г. Щербаков, Р. Барлоу, Ф. Прошан, Х. Шенк, И.М. Комлев, И.Б. Герцбах, Б.С. Сотеков, О.П. Муравлев, Э.К. Стрельбицкий и др. [2, 5, 27, 34, 58-61].

Недостатком вероятностно-статистических методов является то, что они не учитывают физику отказов, и могут иметь систематические погрешности.

При эксплуатации асинхронных двигателей на них воздействуют внешние факторы, климатические условия и внутренние факторы. В зависимости от воздействия, скорость износа деталей и старение изоляции будет различаться. Следовательно, изменяются и параметры надежности.

Физико-статистические методы моделирования предполагают определение зависимости между различными физическими и физико-химическими процессами, которые происходят в структуре применяемых материалов и надежностью узлов АД [61]. Для повышения точности разработки физических моделей отказов объединяют информацию о физических процессах, описанных уравнениями, и статистическую информацию, полученную при эксплуатации.

Выходы из строя АД по причине межвиткового и межфазного замыкания в обмотках статора являются наиболее частым явлением. В работах О.Д. Гольдберга доказано, что замыкание происходит при повышенном напряжении между соседними витками. Поэтому надежность обмоток зависит от характеристик и состояния изоляции, из которых наиболее показательным является значение пробивного напряжения [3].

Исследования Г.И. Фукс в части влияния смазок на надежность узлов трения механизмов показали, что преобладающее влияние на показатели эксплуатационной надежности оказывает качество изготовления поверхностного слоя элементов [62].

В работах А.А. Воробьева, С.Н. Журкова приведена "кривая жизни" полимерной изоляции, разрушение которой зависит от подведенной к ней энергии вне зависимости от ее природы [18].

Структурные методы моделирования чаще всего применяются на этапе проектирования технических систем [63, 64] с большим количеством элементов. Оценка надежности при этом получается предварительной из-за отсутствия исходных данных. Структурный анализ дает возможность оценить надежность

различных элементов в системе, сравнить их между собой и выявить наиболее "слабые" из них, получить информацию о нагруженности элементов. Полученные результаты используются в дальнейшем для доработки структуры системы.

Анализ методов моделирования надежности позволил выявить следующее: для оценки эксплуатационной надежности асинхронных двигателей для лифтов целесообразно на первом этапе использовать вероятностно-статистические методы, так как они дают точные оценки количественных показателей надежности. Кроме того имеется возможность для проведения эксплуатационных наблюдений за АДЛ, имеющими однотипную конструкцию и близкие электромеханические характеристики, установленными в жилых домах и обслуживаемых одной организацией, а соответственно, имеющих одну и ту же систему ТОиР. Точность моделирования не будет снижаться из-за неоднородности информационного потенциала. Кроме того статистическая информация об отказах АДЛ представляется в виде цензурированных данных, то есть состоит из отказавших и неотказавших двигателей. Игнорирование наработок неотказавших двигателей приведет к погрешности расчета. Более того, наблюдения будут проводиться за выборкой двигателей, имеющих определенную наработку на протяжении которой информация об отказах, ремонтах, техническом обслуживании неизвестны. Так как АДЛ является высоконадежным проведем анализ вероятностно-статистических методов моделирования надежности по цензурированным выборкам, классификация которых приведена на рис. 1.5.

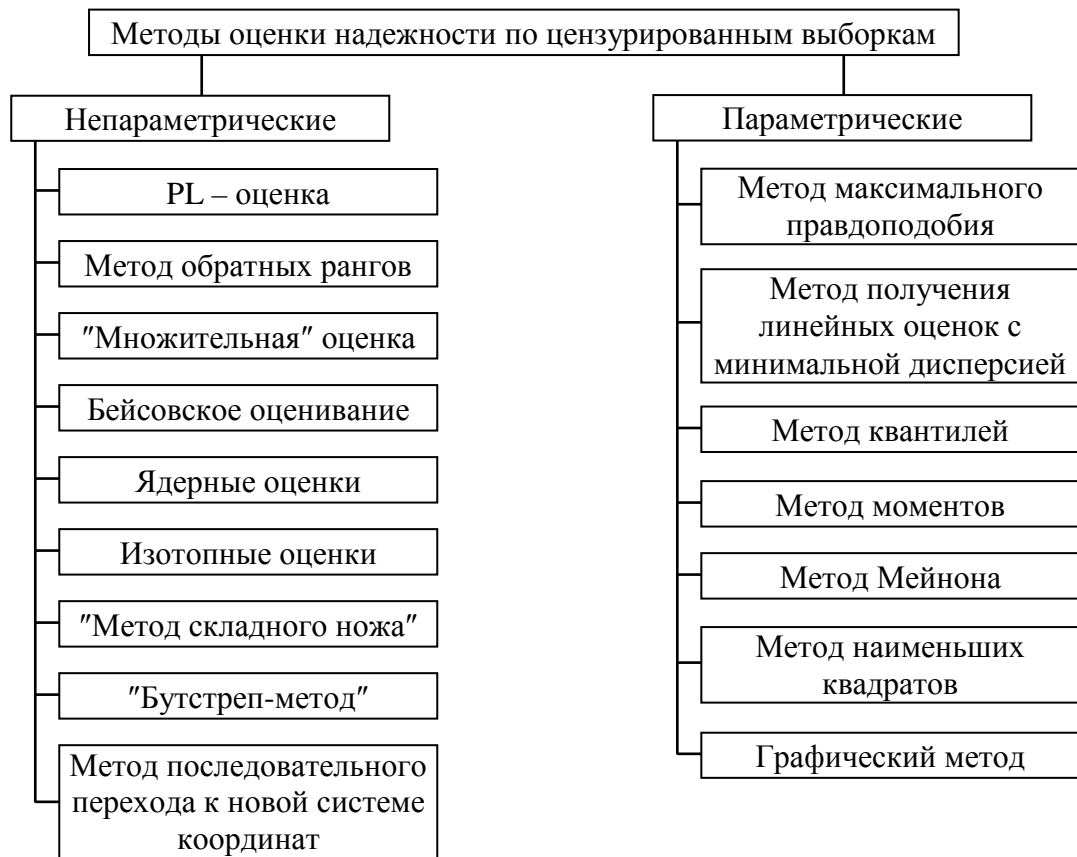


Рис. 1.5. Методы оценки надежности по цензурированным выборкам

Основателем непараметрических методов стал в 1912 году Бёмер. Он предложил метод оценки вероятности безотказной работы, получивший название PL-оценка. Но развитие непараметрические методы получили после опубликования работы Каплана и Майера [65]. Нельсоном был разработан метод обратных рангов, представляющий собой графоаналитический метод [66]. Более подробно эти методы изложены в работах [67, 68]. Позднее были предложены такие методы, как "множительная" оценка, основанная на методе максимального правдоподобия, аналогичная PL-оценке [69], бейсовские оценки [68, 70], ядерные оценки [68, 69, 71], изотопные оценки [69]. Для построения доверительных интервалов оценок используется метод "складного ножа" и являющийся его развитием "бутстреп-метод" [72-75]. Суть этих методов состоит в переходе от одновыборочной схемы к многовыборочной, с таким же распределением. Наиболее распространенным и точным представляется метод последовательного

перехода к новой системе координат. При этом интервал наблюдений разбивается на части, в зависимости от момента цензурирования и PL-оценка последовательно на каждой из частей рассматривается в новой системе координат, что дает возможность использовать математический аппарат полных выборок.

Параметрические методы, в отличие от непараметрических, используются при известном законе распределения, что увеличивает их точность. Одним из первых был разработан метод максимального правдоподобия английским статистиком Фишером в 1912 году [76], и в итоге получил наибольшее распространение. В качестве оценок параметров принимаются значения с максимальной функцией правдоподобия [68, 77]. Максимально правдоподобные оценки для наиболее распространенных законов распределения регламентированы ГОСТами [78, 79].

Суть методов получения исходных оценок с минимальной дисперсией, наименьших квадратов и графического состоит в линеаризации законов распределения, различным для каждого своим способом [72, 76, 80, 81].

Остановимся более подробно на методе наименьших квадратов. На первом этапе применения этого метода с помощью математических операций приводят обе части уравнения необходимого закона распределения к линейному виду. Затем находят параметры этих законов с учетом минимума суммы квадратов отклонений левой и правой частей уравнений.

Большое применение нашел, предложенный К. Пирсоном метод моментов [76]. Сущность метода состоит в приравнивании эмпирических и теоретических моментов распределения [68, 76, 82, 83]. При модернизации этого метода был получен метод Менона. Здесь проводится перевод от одной переменной к другой с экспоненциальным распределением. Еще одним методом оценки является метод квантилей, в котором также приравниваются теоретические и эмпирические значения, только уже вероятностей отказов [76, 82, 83].

В заключении отметим:

1. Для моделирования эксплуатационной надежности лифтовых АД при имеющейся информации об отказах, наиболее целесообразно применять

вероятностно-статистические методы. Они являются более простыми по сравнению с физико-статистическими методами, но в тоже время, дают точные оценки показателей надежности при условии корректного выбора метода. Структурные методы моделирования чаще используются на этапе проектирования систем с большим количеством элементов. Они дают предварительную оценку надежности, необходимую для своевременной доработки изделий. Поэтому структурные методы не нашли применения при моделировании эксплуатационной надежности АДЛ.

2. Эксплуатационная информация об отказах АДЛ представляется в виде цензурированных данных, которые нельзя анализировать с помощью классификации теории надежности. Необходимо использовать специфические методы, которые в свою очередь разделяются на параметрические и непараметрические. Следует отметить, что непараметрические методы достаточно просты в использовании, но не позволяют делать долгосрочные прогнозы, точность их не достаточно исследована в отличие от параметрических, и на этапе оценки эксплуатационной надежности они не применимы.

3. Из всего перечня параметрических методов наиболее исследованным и применяемым представляется метод максимального правдоподобия. Более простыми, и соответственно, менее точными методами считаются методы Менона, квантилей и моментов. Метод наименьших квадратов является достаточно точным, имеет громоздкие уравнения и предполагает использование ЭВМ, что на современном этапе развития компьютерной техники не составляет большой проблемы.

1.5. Существующие системы технического обслуживания и ремонта и их задачи

Высокий уровень надежности асинхронных двигателей на начальном этапе эксплуатации еще не гарантирует их высокой эффективности в процессе всей эксплуатации. Это происходит по причине воздействия на них механических нагрузок, климатических факторов и агрессивных сред. С течением времени детали электрических машин подвергаются износу, а изоляция обмоток старению и разрушению. Изношенные детали и изоляционные материалы приводят к изменению параметров двигателей в целом и в итоге к отказам. В связи с этим огромную важность приобретает проведение различных мероприятий для своевременного предупреждения и оперативного устранения возможных отказов и неисправностей, то есть применение эффективной стратегии технического обслуживания и ремонта, позволяющей повысить уровень надежности АД на всех этапах их эксплуатации [84].

Под стратегией технического обслуживания и ремонта (ТОиР) понимают совокупность принятых принципов, правил, документации, исполнителей и управляющих воздействий, влияющих на эксплуатационные свойства объектов [85, 86]. В настоящее время в России находится более 60 % машин и оборудования за пределами сроков амортизации [87-89]. Такая ситуация возникла по причине того, что в бывшем СССР план обновления основных фондов не выполнялся, а в 90-е годы 20 века замена почти полностью была приостановлена. Зарубежные экономисты считают производство с 50 % изношенного оборудования деградировавшим и признают банкротом [90].

В нашей стране насчитывается большое количество малых и средних промышленных предприятий, которые либо вновь создались, либо образовались на базе крупных предприятий при их делении. И зачастую, в условиях рыночной экономики из-за необходимости большого количества финансовых средств и сил, недостаточное внимание уделяется разработке рекомендаций по ТОиР [86].

Итак, в практике эксплуатации электротехнического оборудования известны следующие стратегии ТОиР: календарная, по потребности, по наработке, комбинированная, по техническому состоянию [85, 88, 90-98]. Каждая из указанных стратегий имеет определенную организацию ТОиР, а также определяет периодичность замены отдельных деталей и узлов.

Календарная стратегия ТОиР предусматривает, что все осмотры объектов проводятся через определенные отрезки времени на протяжении всей эксплуатации, не зависящие от наработки. Одновременно с осмотрами устанавливается вид и объем необходимых работ. Преимуществом такой стратегии является ее простота и удобство планирования.

Стратегия ТОиР, реализованная по потребности, заключается в проведении восстановительных мероприятий только после внезапного выхода объектов из строя. При проведении ремонта на месте устанавливается перечень узлов и деталей, подлежащих замене. Плановые ремонты и осмотры здесь не проводятся. Применение такой стратегии было оправдано при эксплуатации вновь разработанных АД, когда отсутствовала информация об уровне их надежности. При большом количестве отказов изношенных объектов сумма расходов на ремонт будет велика, а стратегия ТОиР не эффективна.

Использование стратегии ТОиР по наработке предполагает для всех однотипных объектов единые объем и периодичность выполнения работ. Определяющее значение в данной стратегии имеет наработка, которая отсчитывается от даты введения объекта в эксплуатацию, не зависимо от того, новый это объект, либо прошедший какой-либо вид ремонта. Наибольшее распространение она получила при обслуживании летательных аппаратов [85], для предотвращения отказов элементов, технический ресурс которых меньше их гарантийного срока.

В начале пятидесятих годов прошлого столетия при объединении ТОиР, организованного по календарному принципу, со стратегией ТОиР по наработке была разработана комбинированная стратегия, получившая название системы планово-предупредительного ремонта. Стратегия ППР является наиболее

распространенной в России в настоящее время. Плановые ремонтные мероприятия осуществляются на основе теории предположения возможного появления отказов. Для предупреждения преждевременного и случайного выхода объектов из строя разрабатываются годовые и месячные графики поддерживающих мероприятий, которые действуют на протяжении всей эксплуатации, основой для которых служат рекомендации заводов-изготовителей, требования к техническому состоянию и безопасности эксплуатации, указанные в нормативно-технической документации на каждый конкретный тип двигателей. Одновременно с планированием сроков ремонтных работ устанавливается их объем. При этом учитываются условия окружающей среды, выполняемые функции и возможное отклонение от номинальных режимов работы АД. Такой подход позволяет заранее подготовить материально-техническую базу и свести к минимуму время остановки объектов.

Система ППР предусматривает проведение с определенной периодичностью текущего обслуживания (ТО), текущего ремонта (ТР), среднего ремонта и капитального ремонта (КР), отличающихся объемом проводимых работ. ТО представляет собой профилактические мероприятия для поддержания АД в работоспособном состоянии. В основном это визуальный осмотр, очистка от загрязнений, проверка заземления, проверка крепления и устранение мелких неисправностей, не приводящих к остановке оборудования. При ТР проводятся работы предусмотренные ТО, а также по замене или восстановлению отдельных узлов и деталей, контроль каких-либо параметров, например, температуры, сопротивления обмоток или других, установленных графиком ППР. Такой ремонт требует остановки оборудования без полного его разбора. Отличительной особенностью среднего ремонта является разборка узлов оборудования с целью замены износившихся. В последнее время средний ремонт – наиболее редкое явление на промышленных предприятиях. Капитальный ремонт АД связан, как правило, с заменой обмоток статора, но при этом также выполняются работы по замене подшипниковых устройств, ремонту вала и устранению других дефектов, обнаруженных в процессе ремонта. Надежность электродвигателей после

капитального ремонта восстанавливается близкой к первоначальной. КР по большей части выполняют специализированные предприятия. Он влечет за собой длительную остановку оборудования.

Своевременное обнаружение дефектов на ранней стадии их развития и замена изношенных деталей положительно сказывается на надежности объектов.

Однако наряду с достоинствами системы ППР она обладает значительным недостатком: неоправданно большим весом плановых ремонтов. Информация, полученная при дефектации двигателей во время ремонтов и их диагностике при проведении ТО не используется в дальнейшем для корректировки разработанных графиков, что экономически не целесообразно. Планы-графики устанавливают усредненные значения межремонтных периодов, а фактическое техническое состояние каждого АД остается неучтенным.

Рассмотренные выше стратегии ТОиР относятся к так называемым "жестким" стратегиям. То есть объем и периодичность обслуживания остаются неизменными, не смотря на информацию о техническом состоянии объекта, полученную при ТОиР. Более прогрессивной является "гибкая" стратегия ТОиР по текущему состоянию. Для применения данной стратегии необходимым условием является экономическая целесообразность, так как оценка технического состояния объектов может проводиться только при периодическом или непрерывном диагностировании, которые в свою очередь требуют наличия:

- системы сбора информации об эксплуатации объекта, чего достаточно часто не хватает при эксплуатации АД;
- подготовленного персонала, имеющего навыки по существующим методикам оценивать техническое состояние объектов и прогнозировать его в перспективе.

Стратегия ТОиР по текущему состоянию предусматривает проведение следующих видов работ:

- планового технического обслуживания по мере выработки ресурса;
- текущего ремонта, объем и периодичность которого, меняется в зависимости от информации, поступившей в процессе эксплуатации;

– капитального ремонта, при достижении предельного состояния, то есть при вероятности безотказной работы ниже установленного уровня.

Еще одним условием для применения такой стратегии является прогнозирование технического состояния объектов во времени. То есть при каждом ТР и ТО на основе сведений, полученных средствами диагностики и информации об обнаруженных дефектах оценивается техническое состояние объекта и прогнозируется на некоторый период времени вперед. Далее устанавливается срок дальнейших мероприятий для поддержания его в работоспособном состоянии.

Каждое предприятие имеет право выбрать любую стратегию ТОиР, но для определения наиболее эффективной необходимо провести анализ организаций ремонта в зарубежных странах.

В зарубежных странах (США, Канада, Япония, Германия, Южная Корея) довольно часто используется система ППР, называемая либо система обслуживания, либо система сохранения [99-103]. Сроки и объемы ремонтов здесь регламентируются предприятиями изготовителями оборудования и указываются в инструкциях по эксплуатации. Отличительной особенностью системы ТОиР в этих странах является отсутствие цехов по восстановлению деталей и узлов, так как их замену всегда проводят на оригинальные запчасти. Централизованный выпуск запасных частей к наиболее распространенному оборудованию выгоден предприятиям-изготовителям за счет увеличенной на них цены в сравнении с собранным изделием. В США проверка и мелкий ремонт осуществляется силами предприятий эксплуатирующих оборудование, а капитальный ремонт – специализированными службами [99, 100]. В Японии большая часть восстановительных работ проводится силами рабочих, эксплуатирующих оборудование. В Германии напротив эта роль отдана производителям оборудования и ремонтным организациям [101-103]. Кроме того в перечисленных странах ведется строгий учет вышедшего из строя оборудования, время его остановки на восстановительные работы, а также нормируются затраты труда. Поэтому можно уверенно говорить о том, что

совершенствование ТОиР в зарубежных странах движется в направлении стратегии по техническому состоянию объекта, то есть проводится замена системы TBM (Time Based Maintenance) на систему CBM (Condition Based Maintenance). Существует еще система, которая допускает эксплуатацию дефектного или изношенного оборудования – RCM (Reliability Based Maintenance). Она предусматривает определенную долю риска возникновения отказа и непрерывный контроль технического состояния объектов с помощью средств диагностики и экспертных оценок [104].

Из вышеприведенного анализа стратегий ТОиР, применяемых в России и зарубежных странах следует, что:

1. Для поддержания высокого уровня надежности АД на протяжении всей эксплуатации необходимо проведение различных мероприятий для своевременного предупреждения и оперативного устранения возможных отказов и неисправностей. В различных отраслях промышленности действует своя система технического обслуживания и ремонта. Кроме того, каждое предприятие имеет право выбора стратегии, которая обеспечит одновременно надежность оборудования, получение максимальной прибыли и снижение эксплуатационных расходов.

2. Наиболее распространенной стратегией ТОиР является планово-предупредительный ремонт, который гарантирует надежную эксплуатацию двигателей путем обнаружения дефектов до того, как произойдет отказ, но в то же время имеет высокий вес плановых ремонтов, зачастую проводимых необоснованно. Для перехода на стратегию ТОиР по техническому состоянию АД необходима эффективная система сбора эксплуатационной информации, подготовленный персонал, умеющий оценивать информацию и использовать ее в дальнейшем для планирования сроков и объемов технических мероприятий и наличие современных средств диагностики, позволяющих оценить техническое состояние не останавливая оборудование и не проводя разборку самих двигателей.

3. Выбор наиболее подходящей стратегии ТОиР необходимо проводить в зависимости от назначения АД, так как выполняемые ими функции, условия эксплуатации, наличие агрессивных сред, режимов работы, качество поступающей электроэнергии, качество обслуживания и ремонта оказывают основное влияние на появление отказов того или иного вида. Кроме того, возможна разработка рекомендаций по совершенствованию текущего обслуживания и ремонта, в основе которых лежит сочетание различных стратегий.

1.6. Постановка задач исследования

По результатам анализа литературных источников о надежности электрических машин, эксплуатационной информации и методах определения показателей надежности было выявлено, что эксплуатационная надежность асинхронных двигателей для лифтов отражена в них не достаточно полно, а повышение надежности пассажирских лифтов и, как следствие, двигателей привода лебедки является актуальной задачей.

В соответствии с этим необходимо поставить ряд конкретных задач:

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.

1.7. Выводы

1. Проблема обеспечения надежности асинхронных двигателей является актуальной на современном этапе развития электромеханики. Так как значительное время существовала тенденция снижения массы активных материалов, экономии обмоточного провода и утончения пазовой изоляции, что привело к повышенному нагреву обмоток. Наиболее новым является направление по созданию энергосберегающих АД, отличающихся повышенным коэффициентом полезного действия и повышенной надежностью. Затраты при изготовлении таких двигателей будут возмещены энергосбережением и минимальным количеством затрат на текущее обслуживание и ремонт. Тем не менее, повышением надежности АД необходимо заниматься на всех этапах их жизненного цикла. Первоначальный уровень надежности закладывается на этапе проектирования двигателей, обеспечивается качественным изготовлением и поддерживается правильной эксплуатацией.

2. В последнее время увеличилось количество публикаций в области надежности по причине того, что процесс проектирования и внедрения новых серий АД является длительным и для повышения надежности уже существующих машин целесообразно проводить исследование их эксплуатационной надежности. Наибольшее внимание уделяется надежности АД находящихся на этапе близком к выработке своего ресурса. Предотвращением отказов занимается теория прогнозирования технического состояния объектов, неразрывно связанная с теорией надежности. Знание количественных показателей надежности на некоторый промежуток времени вперед дает возможность обоснованного планирования срока и объема технических мероприятий поддерживающих работоспособное состояние АД. Обнаружение дефектов узлов двигателей на ранней стадии их развития позволяет проводить техническая диагностика.

3. Отказы АД возникают под воздействием механических и электрических факторов на их узлы и детали. К механическим факторам относятся недостатки

изготовления и сборки. Отказы, произошедшие по причине электрических факторов, делятся на три типа: по напряжению, по току и по сопротивлению.

4. Анализ отказов АД общепромышленного назначения, крановых и взрывозащищенных, позволил выявить наиболее аварийные узлы и детали. Распределение отказов зависит от назначения двигателей и варьируется в зависимости от частоты вращения, мощности и условий окружающей среды. Причем АД, эффективно эксплуатируемые в одних отраслях народного хозяйства, показывают низкую эксплуатационную надежность в других отраслях. Поэтому следует сделать вывод, что для изучения надежности лифтовых асинхронных двигателей необходимы дополнительные исследования.

5. Для эксплуатации лифтов в широком диапазоне грузоподъемности разработано огромное количество типоразмеров лифтовых двигателей, отличающихся как электромеханическими характеристиками, так и конструкцией. В результате анализа было определено, что в жилых зданиях в настоящее время применяются двухскоростные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором. В более ответственных зданиях с повышенными требованиями к точности остановки кабины, а также в многоэтажных и административных зданиях рекомендуется применять двигатели, управляемые с помощью частотных преобразователей.

6. Огромное значение в обеспечении надежности на начальном этапе эксплуатации зависит от грамотного выбора характеристик АДЛ, к которым относятся номинальные мощность и скорость вращения, пусковой и номинальный моменты, используемые в дальнейшем для проектирования привода лебедки лифта.

7. 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. Расчетные показатели

надежности устанавливаются в технических условиях на конкретный типоразмер АДЛ.

8. Для моделирования эксплуатационной надежности лифтовых АД при имеющейся информации об отказах, наиболее целесообразно применять вероятностно-статистические методы. Они являются более простыми по сравнению с физико-статистическими методами, но в тоже время, дают точные оценки показателей надежности при условии корректного выбора метода. Структурные методы моделирования чаще используются на этапе проектирования систем с большим количеством элементов. Они дают предварительную оценку надежности, необходимую для своевременной доработки изделий. Поэтому структурные методы не нашли применения при моделировании эксплуатационной надежности АДЛ.

9. Исследование надежности АДЛ, имеющих малое количество отказов, невозможно без применения методик расчета по цензурированным выборкам, состоящим из отказавших и не отказавших двигателей. Такие выборки предполагают специфический подход к определению количественных показателей надежности и делятся на параметрические и непараметрические. Следует отметить, что непараметрические методы достаточно просты в использовании, но не позволяют делать долгосрочные прогнозы, точность их не достаточно исследована в отличие от параметрических, и на этапе оценки эксплуатационной надежности они не применимы.

10. Из всего перечня параметрических методов наиболее исследованным и применяемым представляется метод максимального правдоподобия. Более простыми, и соответственно, менее точными методами считаются методы Менона, квантилей и моментов. Метод наименьших квадратов является достаточно точным, имеет громоздкие уравнения и предполагает использование ЭВМ, что на современном этапе развития компьютерной техники не составляет большой проблемы. Кроме того существует возможность разработки новых и совершенствования существующих методик применительно к АДЛ.

11. Для поддержания высокого уровня надежности АД на протяжении всей эксплуатации необходимо проведение различных мероприятий для своевременного предупреждения и оперативного устранения возможных отказов и неисправностей. В различных отраслях промышленности действует своя система технического обслуживания и ремонта. Кроме того, каждое предприятие имеет право выбора стратегии, которая обеспечит одновременно надежность оборудования, получение максимальной прибыли и снижение эксплуатационных расходов.

12. Наиболее распространенной стратегией ТОиР является планово-предупредительный ремонт, который гарантирует надежную эксплуатацию двигателей путем обнаружения дефектов до того, как произойдет отказ, но в то же время имеет высокий вес плановых ремонтов, зачастую проводимых необоснованно. Для перехода на стратегию ТОиР по техническому состоянию АД необходима эффективная система сбора эксплуатационной информации, подготовленный персонал, умеющий оценивать информацию и использовать ее в дальнейшем для планирования сроков и объемов технических мероприятий и наличие современных средств диагностики, позволяющих оценить техническое состояние не останавливая оборудование и не проводя разборку самих двигателей.

13. Выбор стратегии ТОиР наиболее подходящей для обеспечения и повышения надежности лифтовых АД необходимо проводить учитывая их назначение, так как выполняемые ими функции, условия эксплуатации, наличие агрессивных сред, режимов работы, качество поступающей электроэнергии, качество обслуживания и ремонта оказывают основное влияние на появление отказов того или иного вида. Кроме того, возможна разработка рекомендаций по совершенствованию текущего обслуживания и ремонта, в основе которых лежит сочетание различных стратегий. Следовательно, необходимо организовать сбор данных об отказах АДЛ в процессе их эксплуатации, так как в настоящее время отсутствуют достаточно полные сведения о причинах выхода их из строя.

14. Также необходимым является разработка математической модели эксплуатационной надежности АДЛ, позволяющей анализировать цензурированные выборки и, на ее основе, программы для ЭВМ, позволяющей оперативно оценивать показатели эксплуатационной надежности. Определение количественных значений показателей надежности позволит проанализировать эксплуатационную надежность АДЛ и разработать рекомендации для совершенствования их технического обслуживания и ремонта.

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

2. СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ ЛИФТОВ

2.1. Основное направление в изучении эксплуатационной надежности асинхронных двигателей для лифтов

Конечной целью изучения эксплуатационной надежности лифтовых асинхронных двигателей является повышение надежности и безопасности использования лифтов в целом. При этом необходимым условием должно быть снижение финансовых ресурсов, затраченных на восстановление и поддержание в работоспособном состоянии элементов АДЛ. Двигаясь к указанной цели, необходимо в первую очередь установить перечень элементов лифта, наиболее существенно влияющих на его надежность, и определить является ли асинхронный двигатель основного привода лебедки таким элементом. Лифт работает как единая система и не имеет смысла изучать надежность какого-либо из его элементов изолированно от других. Инструментом для решения задачи может служить системный анализ, позволяющий выполнять детализацию исследуемого объекта и определять степень влияния надежности элементов на общую надежность лифта, а также облегчает сбор информации об отказавших узлах и деталях в процессе эксплуатации [105-107]. Построение структурной схемы лифта даст возможность определить значимость каждого элемента методом экспертных оценок [108]. Распределение отказов по элементам не несет в себе полной информации. Так как элементы с большим количеством отказов могут иметь малое время восстановления и наоборот, например, отказы АДЛ приводят к длительному простое лифтов, хотя происходят значительно реже, чем отказы осветительных ламп. Еще одним определяющим фактором является стоимость восстановительных работ. Итак, определение коэффициентов относительной важности методом экспертных оценок поможет учесть весь спектр факторов и более эффективно распределить ресурсы для достижения главной цели.

Основные варианты опроса экспертов:

1. Подцели каждого уровня ранжируются в зависимости их важности для достижения уровня общей цели.
2. Подцели ранжируются в зависимости их важности для цели, которой они подчинены.

Наиболее предпочтительнее использовать второй вариант опроса, так как соизмерять и анализировать подцели значительно проще по отношению к цели предыдущего уровня, чем по отношению к уровню общей цели, а затем провести нормировку и получить окончательные значения коэффициентов относительной важности (КОВ). Следует отметить, что первый вариант опроса применительно к многоуровневым деревьям целей практически не выполним.

Для получения однородной информации исследования должны проводиться в приблизительно одинаковых условиях, то есть здания, в которых установлены лифты, должны быть близкой этажности и назначения. Лифты, в свою очередь, должны иметь одинаковую конструкцию и грузоподъемность, а соответственно укомплектовываться АДЛ однотипной конструкции, приблизительно одинаковой мощности и частоты вращения. Большое значение имеет выявление электрических и механических факторов приводящих к отказам двигателей того или иного вида. Исключение по возможности их действия приведет к повышению надежности АДЛ.

Следующим этапом должен являться выбор и определение показателей, необходимых для оценки надежности АДЛ. Такими показателями могут являться показатели безотказности (вероятность безотказной работы, средняя наработка до отказа, наработка на отказ), долговечности (ресурс до капитального ремонта), ремонтпригодности (среднее время восстановления), а также комплексные показатели надежности (коэффициент готовности, коэффициент технического использования) [1]. Выбор метода исследования зависит от особенностей информации, поступающей в процессе эксплуатации. Автором выявлено, что в настоящее время сбор эксплуатационной информации о лифтовых асинхронных двигателях не проводится. В диспетчерских журналах ежедневно фиксируется

время всех остановок лифта, их причины и проведенные работы, вне зависимости от вышедшего из строя элемента. Записанная информация в большей степени зависит от добросовестности и квалификации обслуживающего персонала. Современные лифты оборудованы системой управления, фиксирующей коды ошибок, но конкретную информацию можно получить только после более детального осмотра АДЛ электромехаником. Сбор информации усложняется из-за отсутствия датчиков наработки, невозможно определить точное время работы АДЛ. Итак, единственной информацией, которую возможно получить, является дата отказа того или иного двигателя и его причина, поэтому для моделирования эксплуатационной надежности АДЛ наиболее целесообразно применять вероятностно-статистические методы. Они одновременно являются простыми и дают точные оценки показателей надежности при условии их корректного использования. Вероятностно-статистические методы разделяются на параметрические и непараметрические. Непараметрические методы достаточно просты в использовании, но не позволяют делать долгосрочные прогнозы, точность их не достаточно исследована в отличие от параметрических, и на этапе оценки эксплуатационной надежности они не применимы. Кроме того отказы любых технических устройств делятся на приработочные, износные и внезапные. Каждый тип отказов характеризуется своим статистическим законом распределения и требует различной математической обработки [1], что еще раз подтверждает правильность выбора параметрических методов моделирования. Объективный выбор закона распределения (нормального, логнормального, экспоненциального, Вейбулла) осуществляется путем формирования исходного массива данных, состоящего из наработок на отказ и наработок до цензурирования и расчета коэффициента корреляции, показывающего степень согласия теоретического и эмпирического распределений [109, 110].

Оценить надежность АДЛ, имеющих малое количество отказов невозможно с помощью классической теории надежности. Статистическая информация, полученная в процессе эксплуатации, представляется в виде цензурированных данных. В качестве данных, в нашем случае, используются значения наработок

отказавших и не отказавших АДЛ. Цензурирование – это событие, приводящее к прекращению наблюдения за объектом до наступления отказа определенного вида или предельного состояния [20]. Данные, полученные при этом носят название цензурированных, а сформированные из них выборки, соответственно, цензурированных выборок (ЦВ). При этом наработки до отказа принято называть полными наработками, а наработки до прекращения наблюдений – неполными. Ниже перечислены причины, которые привели к цензурированию данных исследуемых АДЛ:

1. Ввод пассажирских лифтов в эксплуатацию происходит по мере строительства зданий, а в настоящее время даже подъездов. Поэтому принято решение сформировать выборку АДЛ, имеющих различные даты начала работы.

2. Строительство зданий – длительный процесс, и формирование достаточной для исследований выборки только из вновь установленных двигателей практически невозможно, поэтому в ее состав вошли АДЛ информация об отказах и проведенных ремонтах, которых до начала исследований отсутствует. За начало эксплуатации принято начало наблюдений. Такая ситуация возникла из-за отсутствия системы сбора сведений об отказах и ремонтах, поэтому информация об АДЛ эксплуатируемых длительный срок была либо потеряна либо хранится разрозненно и для ее обработки требуется неоправданно большое количество времени.

3. Цензурирование возникло по причине существования отказов различных видов. Оценку надежности узлов двигателя следует проводить независимо друг от друга. Например, при оценке надежности обмотки статора в случае отказа подшипника наблюдение прекращается, так как возникает необходимость в его замене, а соответственно и в выводе из эксплуатации двигателя.

4. Высокая надежность АДЛ не позволяет за короткий промежуток времени получить выборку, состоящую только из наработок до отказа. Вынужденное прекращение наблюдений из-за необходимости оценки эксплуатационной надежности также привело к цензурированию.

Перечисленные причины вызывают цензурирование информации об отказах АДЛ в реальных условиях эксплуатации. При проведении испытаний двигателей сознательно формируют ЦВ по различным планам. Выбирается один из критериев: длительность наблюдений, количество отказов или наработка.

В зависимости от времени возникновения интервала неопределенности ЦВ разделяются на цензурированные справа, слева и интервалом [20]. По первым двум причинам возникает цензурирование слева, то есть перед временем наблюдения за АДЛ находится интервал неопределенности (рис. 2.1.б).

Если такой интервал следует за временем наблюдения (третья и четвертая причина), то можно говорить о цензурировании справа (рис. 2.1.а). Расположение интервала неопределенности справа и слева носит название цензурирования интервалом, что и имеет место в нашем случае.

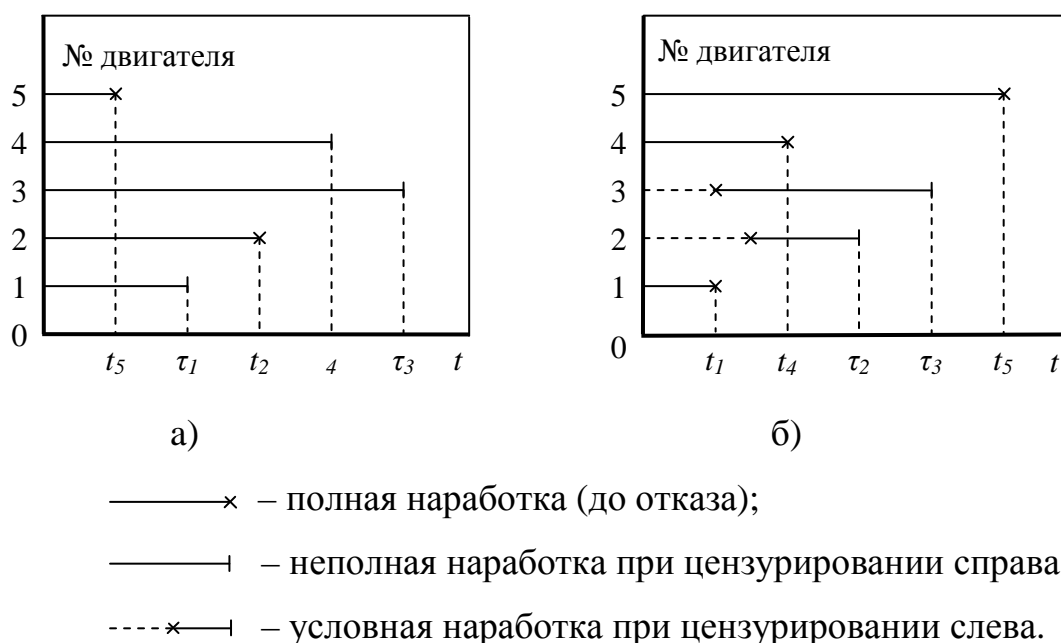


Рис. 2.1. Распределение наработок: а) при цензурировании справа;
 б) при цензурировании слева

На рис. 2.1 указаны полные наработки (t) и неполные (условные) наработки (τ), которые необходимо учитывать при анализе эксплуатационной надежности АДЛ.

Дальнейшее разделение выборок проводится на однократно и многократно цензурированные. Однократно ЦВ, как правило, встречаются при испытаниях, когда объекты имеют одно и то же время ввода в эксплуатацию, а наблюдения останавливают одновременно за всеми объектами. Они состоят из полных наработок и неполных равных между собой. При эксплуатации АДЛ выборки представляются многократно цензурированными, то есть неполные их наработки между собой не равны, что в основном происходит из-за разного времени ввода лифтов в эксплуатацию и разделения отказов по видам. Процесс формирования исходного массива данных при наличии цензурирования имеет важное значение в исследовании эксплуатационной надежности АДЛ, поскольку допущенные ошибки снижают точность оценки показателей надежности.

Подводя итог, следует отметить, что лифтовые асинхронные двигатели необходимо рассматривать не изолированно, а как элемент лифта, представляющего собой систему. Построение структурной схемы лифта с помощью системного анализа даст возможность наглядно представить распределения отказов элементов. Оценивать значимость каждого элемента необходимо методом экспертных оценок, который поможет учесть весь спектр факторов, влияющих на надежность лифта при отсутствии полной информации о длительности их простоя, стоимости восстановительных работ и более эффективно распределить ресурсы для достижения главной цели.

Огромной трудностью в оценке и повышении эксплуатационной надежности АДЛ является недостаточное количество информации от их отказах, несмотря на огромный парк пассажирских лифтов. Выход из сложившейся ситуации можно найти, совершенствуя методики расчета количественных показателей надежности. Основными предъявляемыми требованиями являются возможность учета наработок, не отказавших АДЛ (цензурированных данных) и обработки выборок большого объема. ЦВ предполагают громоздкие вычисления и для оперативной оценки показателей ЭН необходимо применение прикладных математических пакетов для ЭВМ, которые в свою очередь должны обладать простотой использования и наглядностью вычислений и полученных результатов.

Только так можно оценить надежность АДЛ, выявить недостатки их эксплуатации, откорректировать периодичность и трудоемкость текущего обслуживания и ремонта, подготовить материально-техническую базу, уменьшить длительность простоя пассажирских лифтов и снизить финансовые затраты.

2.2. Структурная модель эксплуатационной надежности лифта

Каждый пассажирский лифт работает как единая система и для обеспечения его бесперебойной работы необходимо повышение надежности его элементов, одним из которых является асинхронный двигатель основного привода лебедки. Конструкция лифта состоит из довольно большого числа элементов и на начальном этапе сложно оценить влияние надежности определенного элемента на надежность лифта в целом. Возникает необходимость в разработке структурной модели.

Поставленную задачу автором решено осуществить при помощи системного анализа [105-107]. Для этого пассажирский лифт выделим из окружающего мира и считаем единой системой. Детализация составных элементов системы проведена с использованием общего вида лифта (рис. 2.2) и руководства по эксплуатации на пассажирский лифт [111], дающего более полное представление о его структуре.

Пассажирский лифт грузоподъемностью до 400 кг состоит из следующих основных частей: лебедки, кабины с приводом дверей, дверей шахты, противовеса и подвески, направляющих движения, оборудования приямка, установки конечного выключателя (с ограничителем скорости), шунтов и датчиков, вспомогательного электрооборудования [112-115].

Транспортирование груза и пассажиров проводится в кабине (2), перемещающейся по вертикально установленным направляющим движения (4). Направляющие движения (3, 4) обеспечивают фиксированный путь движения кабины и противовеса (10), исключают их разворот вокруг вертикальной оси и раскручивание. Движение кабины обеспечивает лебедка (1), которая установлена в машинном помещении (7). Там же установлен конечный выключатель с ограничителем скорости (9), служащие для приведения в действие ловителей кабины (противовеса) при ее движении вниз со скоростью превышающей допустимую. На каждом этаже для входа и выхода из кабины шахта имеет проемы, закрытые дверями (5).

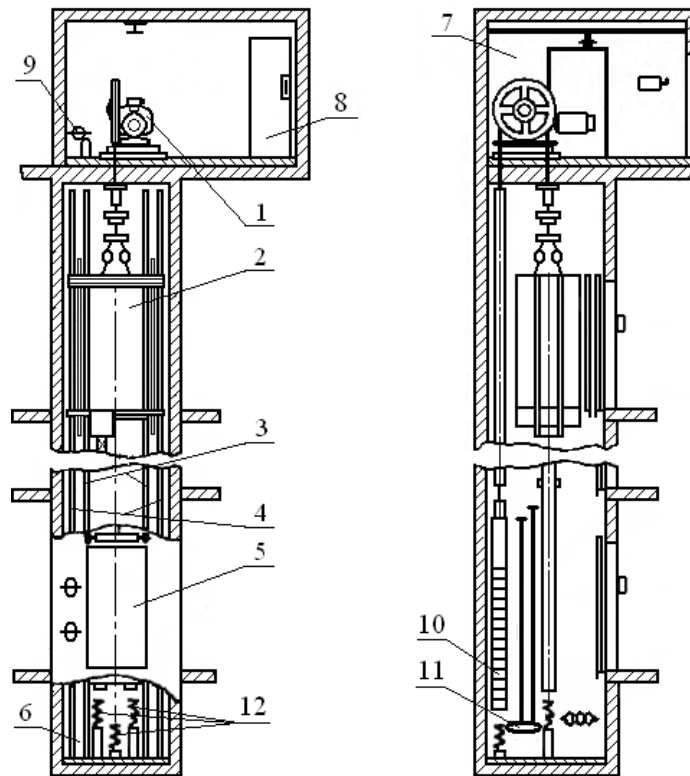


Рис. 2.2. Общий вид пассажирского лифта:

1 – лебедка; 2 – кабина; 3 – направляющие противовеса; 4 – направляющие кабины; 5 – двери шахты; 6 – приямок; 7 – машинное помещение; 8 – станция управления; 9 – ограничитель скорости; 10 – противовес; 11 – натяжное устройство каната ограничителя скорости; 12 – буферы кабины и противовеса.

В приянке (6), находящимся в нижней части шахты, расположено оборудование, включающее: натяжное устройство каната ограничителя скорости (11), связанное посредством каната с ограничителем скорости, буферы кабины и противовеса (12), необходимые для ограничения их хода. К вспомогательному электрооборудованию относятся: станция управления (8), приборы и аппараты, находящиеся в машинном помещении, электропроводка, а также лампы освещения.

Следующим этапом проведено распределение элементов на всех уровнях, а также выявлена взаимосвязь между ними.

На первом уровне целесообразно разделить лифт на две подсистемы: A_1^1 – подсистему электрооборудования; B_1^1 – механическую подсистему (рис. 2.3).

На втором уровне показаны основные составные части пассажирского лифта (9 элементов) так, как они указываются в технической документации [111]: A_1^2 – лебедка; A_2^2 – кабина с приводом дверей; A_3^2 – шунты и датчики, установленные в шахте лифта и на кабине, предназначенные для подачи в систему управления лифтом команды на изменение скорости, на остановку, а также для определения местонахождения кабины на верхней или нижней остановке; A_4^2 – вспомогательное электрооборудование; B_1^2 – направляющие движения; B_2^2 – противовес предназначен для уравнивания веса кабины и половины грузоподъемности лифта, с помощью подвески и тяговых канатов размещен в шахте лифта; подвеска также необходима для движения кабины при помощи тяговых канатов; B_3^2 – двери шахты; B_4^2 – оборудование приямка; B_5^2 – установка конечного выключателя (с ограничителем скорости), служащие для приведения в действие ловителей кабины (противовеса) при ее движении вниз со скоростью превышающей допустимую.

На третьем уровне выделены элементы (21 элемент), из которых состоят основные части лифта: A_1^3 – двухскоростной асинхронный двигатель; A_2^3 – колодочный тормоз останавливает вращение ротора двигателя и удерживает кабину и противовес при выключенном двигателе; A_3^3 – червячный цилиндрический редуктор уменьшает скорость вращения и одновременно увеличивает крутящий момент на выходном валу; A_4^3 – коммутирующая аппаратура; A_5^3 – канатоведущий шкив и струбница, используемая для зажима канатов в ручьях канатоведущего шкива; A_6^3 – двигатель привода дверей; A_7^3 – привод дверей гарантирует безопасность пользования кабиной, то есть обеспечивает реверс электродвигателя при появлении в дверном проеме

препятствия; A_8^3 – кабина состоит из балок, потолка, створок, щитов, смазывающего устройства, подвижного пола, обеспечивающего контроль степени загрузки кабины, амортизатора, подвески канатов, устройства контроля слабины тяговых канатов, тормозного башмака, ловителя для экстренной остановки и удержания кабины, выключателя и др.; A_9^3 – шунты установлены на разных отметках по высоте подъема в шахте лифта и на кабине; A_{10}^3 – датчики расположены в верхней и нижней части шахты лифта и на кабине. Шунты и датчики обеспечивают автоматическую работу лифта: при их взаимодействии в систему управления лифтом подается команда на изменение скорости, на остановку, а также определяется местонахождение кабины на верхней или нижней остановке; A_{11}^3 – станция управления; A_{12}^3 – приборы и аппараты, находящиеся в машинном помещении; A_{13}^3 – лампы освещения; B_1^3 – направляющие кабины; B_2^3 – направляющие противовеса; B_3^3 – противовес с помощью подвески размещен в шахте лифта, уравнивает вес кабины и половину грузоподъемности лифта; B_4^3 – подвеска; B_5^3 – натяжное устройство с помощью каната, связанное с ограничителем скорости; B_6^3 – буферы кабины и противовеса, необходимые для ограничения хода и останавливающие их с допустимым замедлением; B_7^3 – конечный выключатель, прерывающий цепь безопасности; B_8^3 – ограничитель скорости.

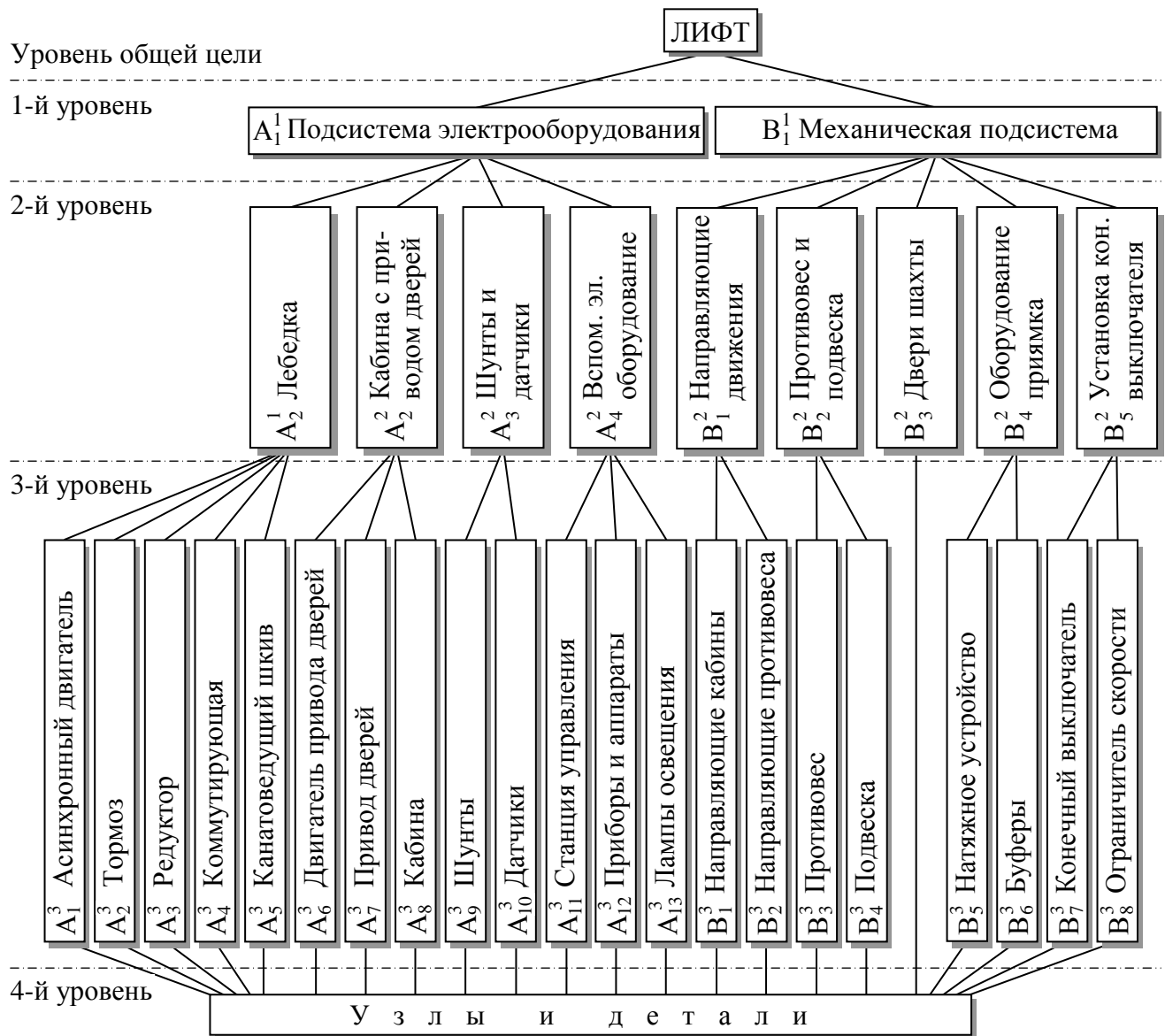


Рис. 2.3. Структурная модель пассажирского лифта

Приведенная на рис. 2.3 структурная модель пассажирского лифта имеет вид дерева целей и представляет собой иерархическую структуру [116]. Уровень общей цели представляет собой обеспечение надежности пассажирского лифта в целом. На первом уровне необходимо оценить надежность механических элементов и электрооборудования. На следующих уровнях проведено деление на основные составные части и их элементы. И хотя третий уровень модели показал достаточно условное разбиение элементов на подсистему электрооборудования и механическую подсистему, модель не теряет своих свойств и определяет порядок расчета надежности: надежность элементов каждого предыдущего

иерархического уровня является основой для надежности элементов последующего уровня.

Для определения влияния надежности элементов лифта на его общую надежность был проведен опрос группы экспертов Томского политехнического университета и ООО "Томская лифтовая компания". Эксперты присвоили ранги (места) элементам в зависимости от их важности. Количество рангов соответствует количеству сравниваемых между собой элементов. При этом учитывалось не только количество отказов элементов, но и длительность простоя лифта при выходе их из строя, сложность и стоимость восстановления, а также безопасность перевозки пассажиров. В табл. 2.1, 2.2, 2.3 представлены матрицы результатов опроса экспертов на каждом уровне дерева цели относительно предыдущего уровня.

Таблица 2.1. Матрица опроса экспертов (1 уровень)

Компонент	Эксперт						
	1	2	3	4	5	6	7
A_1^1	1	1	1	2	1	1	2
B_1^1	2	2	2	1	2	2	1

Таблица 2.2. Матрица опроса экспертов (2 уровень)

Компонент	Эксперт						
	1	2	3	4	5	6	7
A_1^2	1	1	1	1	1	1	1
A_2^2	3	2	2	2	2	3	1
A_3^2	2	4	3	3	4	2	4
A_4^2	4	3	4	4	3	4	3
B_1^2	5	5	5	5	4	5	5
B_2^2	3	3	1	1	1	3	2
B_3^2	4	4	3	2	2	1	4
B_4^2	2	1	2	4	4	4	3
B_5^2	1	2	4	3	3	2	1

Таблица 2.3. Матрица опроса экспертов (3 уровень)

Компонент	Эксперт						
	1	2	3	4	5	6	7
A_1^3	3	1	1	1	2	1	1
A_2^3	4	2	4	3	1	2	2
A_3^3	2	4	5	2	4	4	3
A_4^3	1	3	2	5	3	3	4
A_5^3	5	5	3	4	5	5	5
A_6^3	2	1	1	1	1	1	1
A_7^3	1	2	2	2	2	2	3
A_8^3	3	3	3	3	3	3	2
A_9^3	1	2	1	2	2	2	1
A_{10}^3	2	1	2	1	1	1	2
A_{11}^3	1	1	1	2	2	1	1
A_{12}^3	2	2	2	1	3	2	2
A_{13}^3	3	3	3	3	1	3	3
B_1^3	2	2	1	1	1	1	2
B_2^3	1	1	2	2	2	2	1
B_3^3	2	2	2	2	1	2	1
B_4^3	1	1	1	1	2	1	2
B_5^3	1	1	2	1	1	1	2
B_6^3	2	2	1	2	2	2	1
B_7^3	1	2	2	1	1	1	1
B_8^3	2	1	1	2	2	2	2

Для определения КОВ с помощью таблиц EXCEL [117] рассчитаны ранжированные матрицы (табл. 2.4, 2.5, 2.6). Наиболее важной цели соответствует больший удельный вес, поэтому преобразованные ранги определяются по формуле (2.1) [108]:

$$R = R_{\max} - R_j, \quad (2.1)$$

где R – преобразованный ранг; R_{\max} – максимальный ранг, который зависит от количества подцелей, подчиненных одной цели; R_j – ранг, присвоенный экспертом.

Таблица 2.4. Ранжированная матрица (1 уровень)

Таблица 2.5. Ранжированная матрица (2 уровень)

Компонент	Эксперт							Сумма	КОВ
	1	2	3	4	5	6	7		
A_1^2	3	3	3	3	3	3	3	21	0,349
A_2^2	1	2	2	2	2	1	3	13	0,216
A_3^2	2	0	1	1	0	2	0	6	0,099
A_4^2	0	1	0	0	1	0	1	3	0,050
Итого								43	0,714
B_1^2	0	0	0	0	1	0	0	1	0,004
B_2^2	2	2	4	4	4	2	3	21	0,085
B_3^2	1	1	2	3	3	4	1	15	0,060
B_4^2	3	4	3	1	1	1	2	15	0,060
B_5^2	4	3	1	2	2	3	4	19	0,077
Итого								71	0,286

Таблица 2.6. Ранжированная матрица (3 уровень)

Компонент	Эксперт							Сумма	КОВ
	1	2	3	4	5	6	7		
A_1^3	2	4	4	4	3	4	4	25	0,124
A_2^3	1	3	1	2	4	3	3	17	0,085
A_3^3	3	1	0	3	1	1	2	11	0,055
A_4^3	4	2	3	0	2	2	1	14	0,070
A_5^3	0	0	2	1	0	0	0	3	0,015
Итого								70	0,349
A_6^3	1	2	2	2	2	2	2	13	0,134
A_7^3	2	1	1	1	1	1	0	7	0,072
A_8^3	0	0	0	0	0	0	1	1	0,010
Итого								21	0,216
A_9^3	1	0	1	0	0	0	1	3	0,042
A_{10}^3	0	1	0	1	1	1	0	4	0,057
Итого								7	0,099
A_{11}^3	2	2	2	1	1	2	2	12	0,028
A_{12}^3	1	1	1	2	0	1	1	7	0,017
A_{13}^3	0	0	0	0	2	0	0	2	0,005
Итого								21	0,050
B_1^3	0	0	1	1	1	1	0	4	0,002
B_2^3	1	1	0	0	0	0	1	3	0,002
Итого								7	0,004
B_3^3	0	0	0	0	1	0	1	2	0,025
B_4^3	1	1	1	1	0	1	0	5	0,060
Итого								7	0,085
B_5^3	1	1	0	1	1	1	0	5	0,043
B_6^3	0	0	1	0	0	0	1	2	0,017
Итого								7	0,060
B_7^3	1	0	0	1	1	1	1	5	0,055
B_8^3	0	1	1	0	0	0	0	2	0,022
Итого								7	0,077

Из расчетов, полученных на первом уровне, видно, что наиболее весомой эксперты сочли систему электрооборудования (71,4 %). Именно ее надежности

следует уделить наибольшее внимание. На втором уровне важную роль играют лебедка основного привода (34,9 %) и кабина с приводом дверей (21,6 %).

Результаты расчета третьего уровня приведены на рис. 2.4.

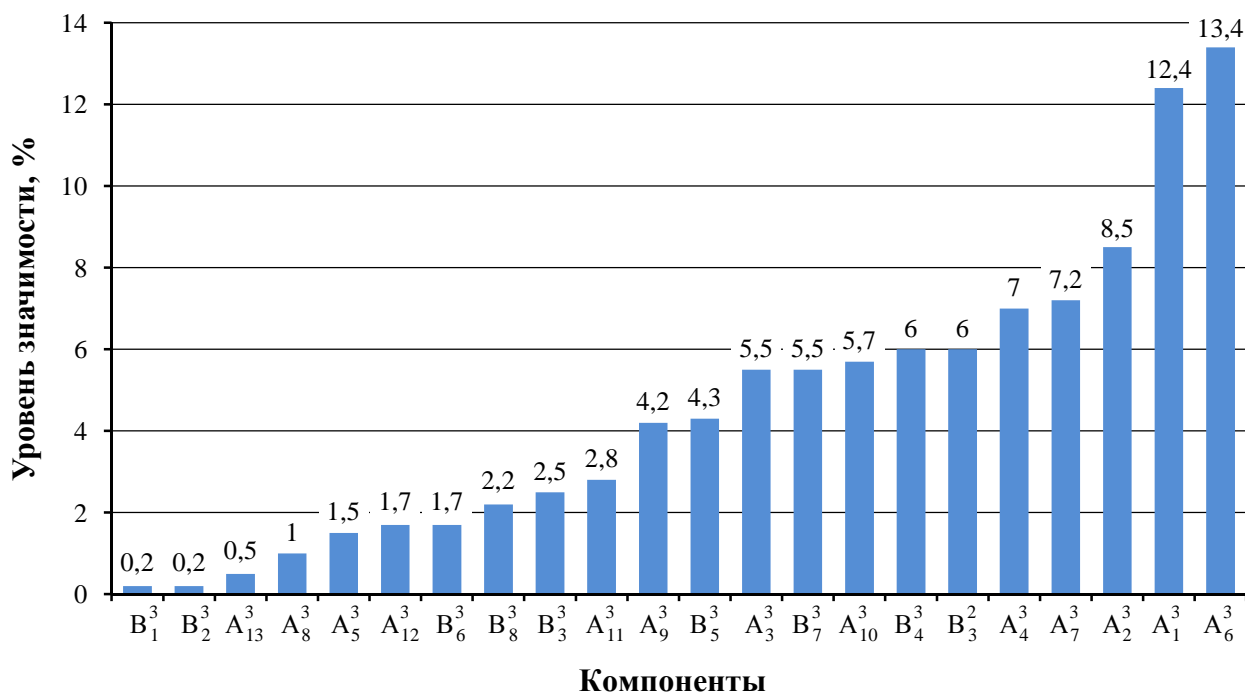


Рис. 2.4. Гистограмма значимости элементов пассажирского лифта

На основе анализа КОВ видно, что наибольший вклад в надежность и безопасность работы лифта вносят двигатель привода дверей (13,4 %), как элемент подверженный значительному воздействию со стороны пассажиров и имеющий большое количество отказов, а также двигатель лебедки (12,4 %), как элемент, требующий длительного времени для его восстановления и дорогостоящего ремонта. На втором месте находится тормоз двигателя лебедки (8,5 %), привод дверей (7,2 %) и коммутирующая аппаратура (7,0%). Их надежность не менее важна для обеспечения работоспособности лифта, но устранение их отказов занимает меньшее количество времени. Следующими в списке важности оказались противовес (6 %) и подвеска (6 %), обеспечивающие безопасность движения кабины. Наиболее надежными являются направляющие

движения (0,2 %). Наименьших усилий направленных на повышение надежности требуется, по мнению экспертов, для ламп освещения (0,5 %).

Таким образом, применение системного анализа относительно исследования надежности пассажирского лифта, позволило упорядочить его элементы и определить порядок расчета их надежности, что представлено в виде дерева целей, имеющего иерархическую структуру. При помощи метода экспертных оценок определены КОВ каждого элемента дерева целей, то есть их вклад в достижение общей цели, которой является обеспечение надежности, работоспособности и безопасности функционирования пассажирского лифта.

Полученные результаты показали, необходимость дальнейшего исследования эксплуатационной надежности АДЛ, поскольку они вносят значительный вклад в надежность и безопасность работы лифта (12,4 %).

2.3. Анализ отказов пассажирских лифтов по данным эксплуатации

Опрос группы экспертов показал, что одним из наиболее ответственных элементов является асинхронный двигатель привода лебедки (12,4 %). Поэтому исследование надежности АДЛ с целью ее повышения является актуальной задачей. Для подготовки массива данных, необходимого при расчете количественных показателей надежности, был автором выполнен анализ отказов 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 и эксплуатирующихся в условиях, указанных в табл. 2.7 [20, 111].

Таблица 2.7. Условия эксплуатации пассажирских лифтов

Параметр	Значение
Высота над уровнем моря	Не более 2000 м
Число включений в час	Не более 120-150
Предельные значения температуры воздуха в машинном помещении	От +40 до +5 °С
Предельные значения температуры воздуха в шахте	От +40 до +1 °С
Верхнее значение относительной влажности	Не более 80 % при температуре +25 °С
Относительная продолжительность включения	Не более 50-60 %.

Исследуемые лифты оборудованы редукторными лебедками, в состав которых входят двухскоростные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором. Обмотка статора АД имеет датчики температурной защиты. Эксплуатационные наблюдения, зафиксированные в журналах диспетчерского пункта ООО "Томской лифтовой компании" в г. Томске получены в результате осмотра лифта электромехаником, а также с помощью систем управления, которые контролируют состояние лифтов. При возникновении неисправности система автоматически определяет характер отказа, высвечивая на индикаторе код ошибки и записывая его в память. Перечень аварийных ситуаций с соответствующими кодами ошибок системы управления электроприводом и

автоматикой пассажирского лифта одного из существующих типов приведен в приложении 1 [112].

Информация об отказах лифтов и проведенных работах фиксируется в общем журнале, отдельно по каждому из элементов статистика не ведется. Автор упорядочил информацию, собранную на протяжении трех лет (декабрь 2010 г. – декабрь 2013 г.) и опираясь на структурную схему эксплуатационной надежности пассажирского лифта, разработанную в предыдущем параграфе (рис. 2.2) было получено распределение отказов по всем основным элементам лифта на каждом уровне дерева целей. Результаты исследования на первом и втором уровнях представлены на рис. 2.4 и 2.5 в виде круговой диаграммы [118].

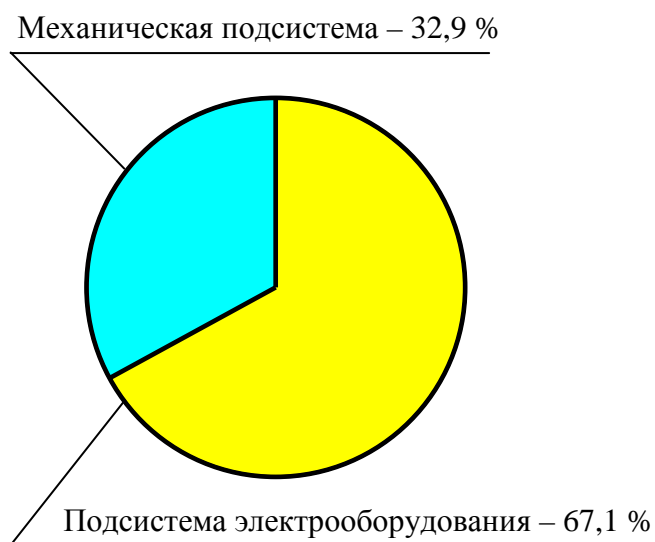


Рис. 2.5. Распределение отказов лифта на первом уровне дерева целей

На первом уровне 67,1 % всех отказов составляют отказы подсистемы электрооборудования и 32,9 % отказов относятся к механической подсистеме, что подтверждает результаты, полученные методом экспертного опроса.

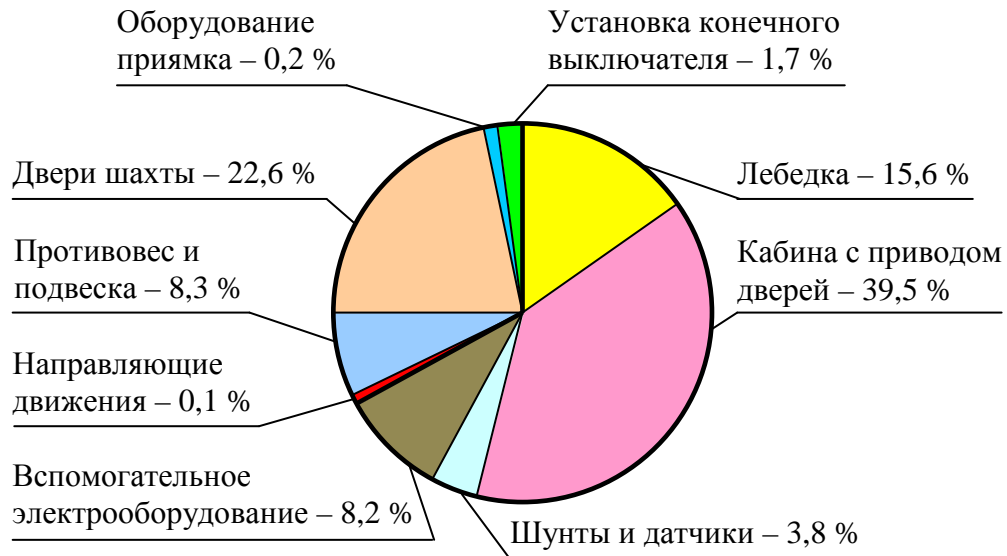


Рис. 2.6. Распределение отказов лифта на втором уровне дерева целей

На втором уровне видно, что наибольшее количество отказов имеют три узла: кабина лифта с приводом дверей (39,5 %), двери шахты (22,6 %) и лебедка (15,6 %). КОВ показывают другое соотношение влияния элементов на надежность лифта. Но в тоже время полученные результаты не противоречат друг другу. При опросе экспертов ставилась задача оценки важности элементов с учетом большого числа факторов, в которые входят не только количество отказов, но и стоимость восстановительных работ, и длительность ремонтов.

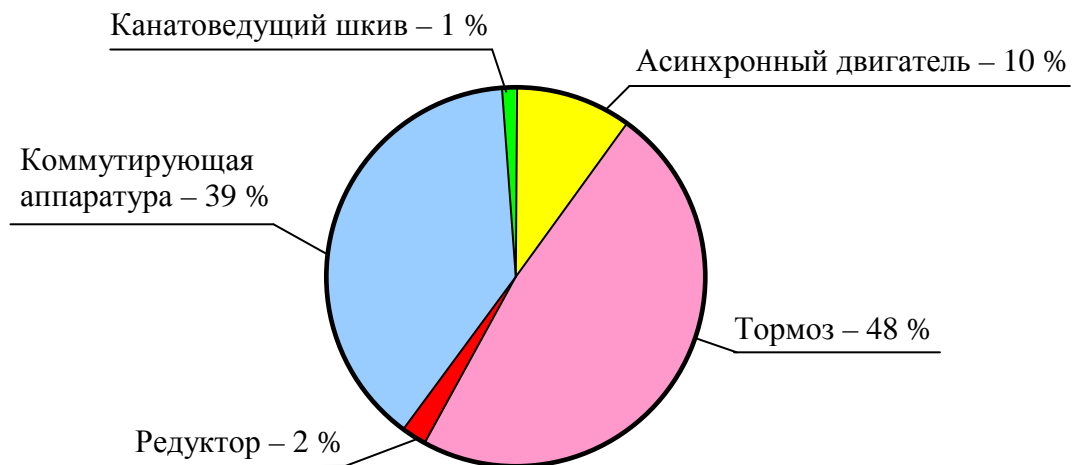


Рис. 2.7. Распределение отказов лебедки на третьем уровне дерева целей

На третьем уровне дерева целей был проведен анализ отказов лебедок, так как в ее состав входят АДЛ, прогнозированию эксплуатационной надежности которых посвящена настоящая работа (рис. 2.7). О надежности остальных элементов можно судить по КОВ, определенным в предыдущем параграфе.

Итак, наибольшее количество отказов приходится на тормоз (48 %) и коммутирующую аппаратуру (39 %), отказы асинхронного двигателя составляют 10 % от общего количества отказов лифта, наиболее надежными элементами являются редуктор (2 %) и канатоведущий шкив (1 %). В табл. 2.8 приведены причины отказов АДЛ.

Таблица 2.8. Отказы АДЛ

Причина отказа	Количество отказов, %
Срабатывание датчиков температурной защиты	38,4
Перегрев обмотки статора	12,8
Увлажнение обмотки статора	11,6
Межвитковое замыкание обмотки статора	5,8
Ослабление крепления лобовых частей обмотки статора	4,6
Ослабление прессовки сердечника статора	2,3
Дисбаланс ротора	2,3
Ослабление крепления АДЛ	3,5
Нарушение пазовой изоляции обмотки статора	2,3
Износ подшипника	2,3
Недостаточное количество смазки в подшипнике	2,3
Дефект выходного конца вала	2,3
Шум в подшипнике	2,3
Межфазное замыкание обмотки статора	1,2
Пробой пазовой изоляции обмотки статора	1,2
Разрушение подшипника	1,2
Заклинивание ротора	1,2
Дефект замка крышки	1,2
Наличие постороннего предмета в АДЛ	1,2

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 принято решение рассматривать их срабатывание как отказ АДЛ. В 12,8 % случаях произошел перегрев ОС без аварийного отключения двигателей в результате неисправностей системы управления и ДТЗ, обнаруженный в основном на стадиях текущего ремонта. 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.

В заключении отметим:

1. Автором собрана и проанализирована информация об отказах элементов 446 идентичных по устройству и назначению тихоходных пассажирских лифтов грузоподъемностью до 400 кг., установленных в жилых домах этажностью от 9 до 17 в г. Томске на протяжении трех лет.

2. В результате проведенного исследования получено распределение отказов на всех уровнях дерева целей, которое показывает, что надежность лифта в значительной степени определяется надежностью лебедки, в которой важную роль играют двухскоростные асинхронные двигатели. Несмотря на то, что на двигатели приходится только 10 % отказов, эти отказы приводят к длительному простою пассажирских лифтов и являются наиболее дорогими по исправлению, как показал экспертный опрос. Из анализа информации о длительностях простоев

установлено: для восстановления рабочего состояния тормоза, редуктора, коммутирующей аппаратуры и канатоведущего шкива в среднем требуется в три раза меньше времени, чем для восстановления двигателей.

3. Получены данные по видам отказов АДЛ, которые позволяют судить о наиболее аварийных из них: статор – 41,8 %, подшипниковые устройства – 8,1 %. Кроме того часто срабатывали датчики температурной защиты (38,4 %), обеспечивая обмоткам дальнейшую работу. Поэтому для обеспечения и повышения надежности АДЛ необходимо более тщательно исследовать эксплуатационную надежность их статоров и подшипниковых устройств на основе данных, полученных в результате наблюдений.

2.4. Массив исходных данных по эксплуатационной надежности асинхронных двигателей для лифтов

В результате анализа методов моделирования эксплуатационной надежности (§ 1.4, § 2.1) было определено, что оценку эксплуатационной надежности АДЛ наиболее целесообразно проводить вероятностно-статистическим методом. Для реализации этого метода необходимо сформировать массив исходных данных. В качестве данных будем использовать значения наработок АДЛ. Согласно ГОСТ наработка – это продолжительность или объем работы изделия [30]. Она может быть выражена в числе пусков, продолжительности нагрузки, продолжительности включений, времени непрерывной работы. В настоящее время сбор эксплуатационной информации о лифтовых асинхронных двигателях не проводится. В диспетчерских журналах ежедневно фиксируется время всех остановок лифта, их причины и проведенные работы, вне зависимости от вышедшего из строя элемента. Единой системы сбора не существует, поэтому записанная информация в большей степени зависит от добросовестности и квалификации обслуживающего персонала. Современные лифты оборудованы системой управления, фиксирующей коды ошибок, но конкретную информацию можно получить только после более детального осмотра АДЛ электромехаником. Если изделие работает непрерывно или оборудовано датчиками наработки, то сбор информации упрощается, достаточно только фиксировать время отказа или данные датчика и продолжительность ремонта. АДЛ эксплуатируются в повторно-кратковременном режиме с частыми пусками и электромагнитным торможением и не оснащены датчиками наработки, поэтому зафиксировать время непрерывной работы не представляется возможным, также как и число пусков. Во время перерывов в работе двигателя подвергаются воздействиям окружающей среды, при этом происходит старение изоляции и пропиточных материалов статорных обмоток. Появившиеся микротрещины увеличивают электропроводность изоляции, приводя к межвитковым замыканиям в обмотке. Таким образом, наработку применительно к

АДЛ следует определять как календарную продолжительность эксплуатации, включающую время полезного функционирования и перерывов. Кроме того, за время наблюдений часть двигателей, входящая в выборку не имеет отказов. Для получения более точных показателей надежности наработка этих двигателей также включается в массив данных, но при этом носит название наработки до цензурирования. Ограничивая продолжительность наблюдений, было получено цензурирование справа. Отсутствие информации до начала наблюдений и разбиение выборки на группы привело к цензурированию слева, так же как и различный ввод в эксплуатацию двигателей, входящих в состав пятой группы (табл. 2.9). Полученная в результате цензурированная выборка носит название многократно цензурированной интервалом.

С целью дальнейшего исследования автором собрана эксплуатационная информация 446 трехфазных малошумных АДЛ с короткозамкнутым ротором, установленных в тихоходных пассажирских лифтах до 400 кг в жилых домах этажностью от 8 до 17, в период с 1986 г. по 2011 г в г. Томске.

Исследуемые АДЛ эксплуатируются от сети переменного тока частотой 50 Гц и напряжением питания 380 В. Вид их климатического исполнения – УЗ, класс нагревостойкости изоляции – F. Для получения более точных результатов вышеуказанная выборка АДЛ разбита на 5 групп в зависимости от даты начала их эксплуатации (табл. 2.9).

Таблица 2.9. Группы исследуемых АДЛ

Номер группы АДЛ	Дата начала эксплуатации, гг.
1	1986-1989
2	1990-1994
3	1995-1999
4	2000-2000
5	2005-2011

Проведенное разбиение, в нашем случае, является необходимым в виду отсутствия информации об отказах и ремонтах АДЛ до начала наблюдений.

Соответственно двигатели, имеющие различную длительность эксплуатации, имеют различное техническое состояние и эксплуатационную надежность.

Как было определено ранее, наибольшее количество отказов приходится на статор (41,8 %), причем срабатывание датчиков температурной защиты также принимается за отказ (38,4%), так как происходит остановка лифта. Надежность статора определяет надежность АДЛ и требует более детального исследования. В табл. 2.10-2.14 представлены статистические данные о наработке 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). Более подробная информация об отказах приведена в приложении 2.

Таблица 2.10. Нарботки статоров АДЛ, установленных в 1986–1989 гг.

№ АДЛ	Индикатор наличия отказа	Нарботка, ч	№ АДЛ	Индикатор наличия отказа	Нарботка, ч
1	1	26150	44	1	1305
2	1	14131	45÷46	0	26232
3	1	22232	47	1	18394
4	1	23332	48÷49	0	26232
5	1	20151	50	1	20997
6÷7	0	26232	51÷57	0	26232
8	1	25265	58	0	13896
9÷12	0	26232	59÷60	0	26232
13	1	232	61	1	14470
14	0	26232	62÷72	0	26232
15	1	26220	73	1	12349
16	0	26232	74÷76	0	26232
17	1	24737	77	1	8152
18	1	6238	78	0	26232
19	0	26232	79	1	12069
20	1	4298	80÷86	0	26232
21÷27	0	26232	87	1	1450
28	1	18540	88	1	21467
29÷31	0	26232	89	1	13365
32	1	10018	90	1	12470
33÷40	0	26232	91	1	3609
41	1	9232	92	1	16483
42	1	22328	93÷96	0	26232
43	0	26232			

Таблица 2.11. Нарботки статоров АДЛ, установленных в 1990–1994 гг.

№ АДЛ	Индикатор наличия отказа	Нарботка, ч	№ АДЛ	Индикатор наличия отказа	Нарботка, ч
97	0	26232	131÷149	0	26232
98	1	26230	150	1	8963
99	1	2232	151÷156	0	26232
100÷101	0	26232	157	0	16569
102	1	25232	158	1	12204
103	0	26232	159	0	26232
104	1	1281	160	1	16594
105÷121	0	26232	161÷180	0	26232
122	1	8337	181	0	14586
123÷129	0	26232	182	1	14640
130	0	12660	183÷185	0	26232

Таблица 2.12. Нарботки статоров АДЛ, установленных в 1995–1999 гг.

№ АДЛ	Индикатор наличия отказа	Нарботка, ч	№ АДЛ	Индикатор наличия отказа	Нарботка, ч
186	1	26040	209	1	15523
187÷189	0	26232	210÷222	0	26232
190	1	9523	223	0	9635
191÷197	0	26232	224÷228	0	26232
198	1	20265	229	0	13073
199÷203	0	26232	230	1	4193
204	0	2722	231	1	13312
205÷206	0	26232	232÷233	0	26232
207	1	16099	234	1	18042
208	0	26232	235÷255	0	26232

Таблица 2.13. Нарботки статоров АДЛ, установленных в 2000–2004 гг.

№ АДЛ	Индикатор наличия отказа	Нарботка, ч	№ АДЛ	Индикатор наличия отказа	Нарботка, ч
256	1	17004	272	0	3662
257	0	26232	273÷290	0	26232
258	0	2795	291	0	20465
259	0	26232	292	0	3129
260	1	26230	293÷318	0	26232
261	1	10569	319	1	15228
262	0	12801	320÷328	0	26232
263	0	26232	329	1	1070
264	0	18907	330	1	14112
265	1	5877	331÷332	0	26232
266	0	26232	333	0	2870
267	1	17995	334÷338	0	26232
268÷271	0	26232			

Таблица 2.14. Нарботки статоров АДЛ, установленных в 2005–2011 гг.

№ АДЛ	Индикатор наличия отказа	Нарботка, ч	№ АДЛ	Индикатор наличия отказа	Нарботка, ч
339	0	26232	406÷407	0	21312
340	0	4094	408	0	19536
341	1	26202	409	1	5303
342	1	15973	410	1	5604
343÷350	0	26232	411	0	18888
351	1	22424	412	0	18384
352	1	12299	413	1	374
353	0	26232	414	0	17568
354	1	4725	415	0	18648
355÷364	0	26232	416	0	17568
365	1	3131	417	0	16608
366÷367	0	26232	418÷419	0	16584
368	1	12212	420	0	16392
369	0	17794	421	1	5531
370÷375	0	26232	422	0	16392
376	1	8233	423	0	16248
377÷381	0	26232	424	1	2968
382	1	16018	425	1	2962
383	0	26232	426	0	16248
384	1	18647	427	1	2222
385÷390	0	26232	428÷432	0	16104
391	1	858	433÷434	0	15768
392	1	836	435	0	15600
393÷396	0	26232	436÷439	0	15360
397	1	5897	440	0	14640
398÷401	0	26232	441÷442	0	13920
402	1	4424	443	0	13008
403÷404	0	26232	444	0	12984
405	1	13366	445÷446	0	12912

В выше приведенных таблицах графа "Индикатор наличия отказа" дает возможность отличить наработку до отказа (1) от наработки до цензурирования (0). За нулевую точку автором принято начало наблюдений, предшествующее время эксплуатации представлено периодом неопределенности.

Полученный массив данных представляет собой выборку большого объема и требует обработки по интервалам, то есть построения гистограмм. В качестве оценки эксплуатационной надежности автором принята интенсивность отказов $\lambda(t)$ как наиболее наглядный показатель, позволяющий в дальнейшем определить другие показатели надежности.

Интенсивность отказов для конца каждого из интервалов определяется по формуле [15, 119]:

$$\lambda(t) = \frac{N(t) - N(t + \Delta t)}{N(t + \Delta t) \cdot \Delta t}, \quad (2.2)$$

где $N(t)$ – количество АДЛ, работающих в момент времени t , $N(t + \Delta t)$ – количество АДЛ, работающих в момент времени $(t + \Delta t)$.

Преобразовывая формулу (2.2) в части учета цензурированных наработок, получена формула, позволяющая осуществить построение гистограмм по данным, представленным в табл. 2.10-2.14:

$$\lambda_{emp}(t_k) = \frac{a_k}{\left(N - \sum_{k=1}^k (a_k + k_{0k}) \right) \cdot \Delta t}, \quad (2.3)$$

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.

Число интервалов разбиения определяется по формуле [110]:

$$k = 5 \cdot \log a, \quad (2.4)$$

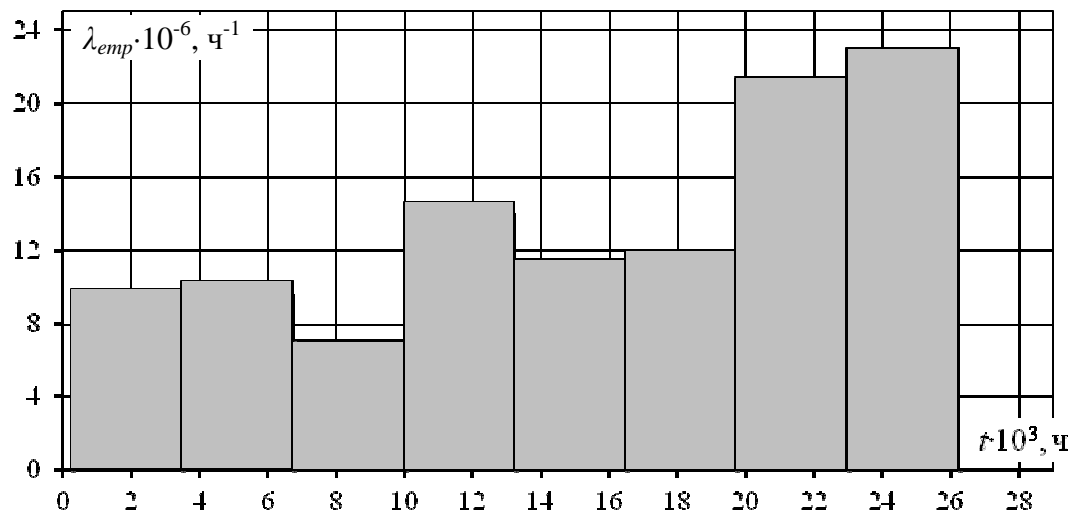
где a – количество отказов АДЛ за весь период наблюдения.

Ширина интервала [110]:

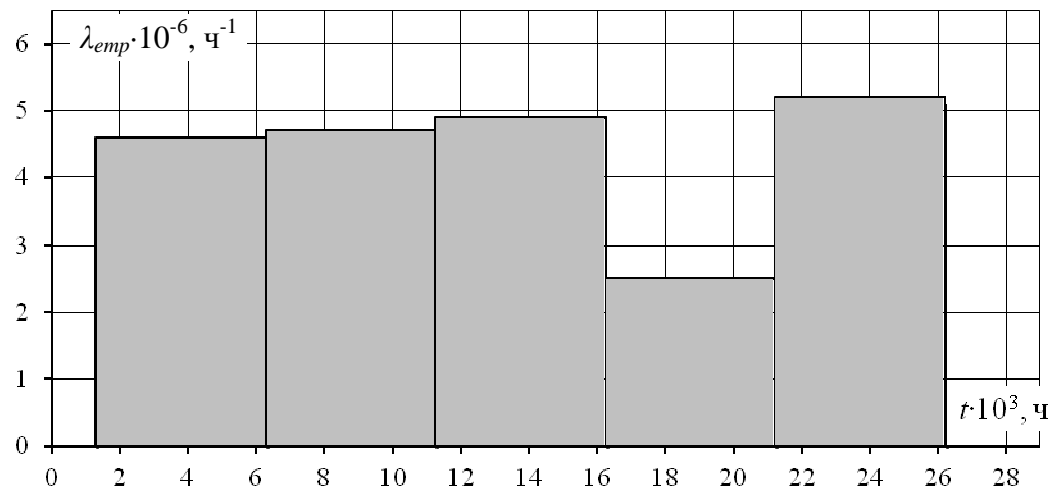
$$\Delta t = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{k}, \quad (2.5)$$

где t_{\max} – наибольшее значение наработки до отказа; t_{\min} – наименьшее значение наработки до отказа.

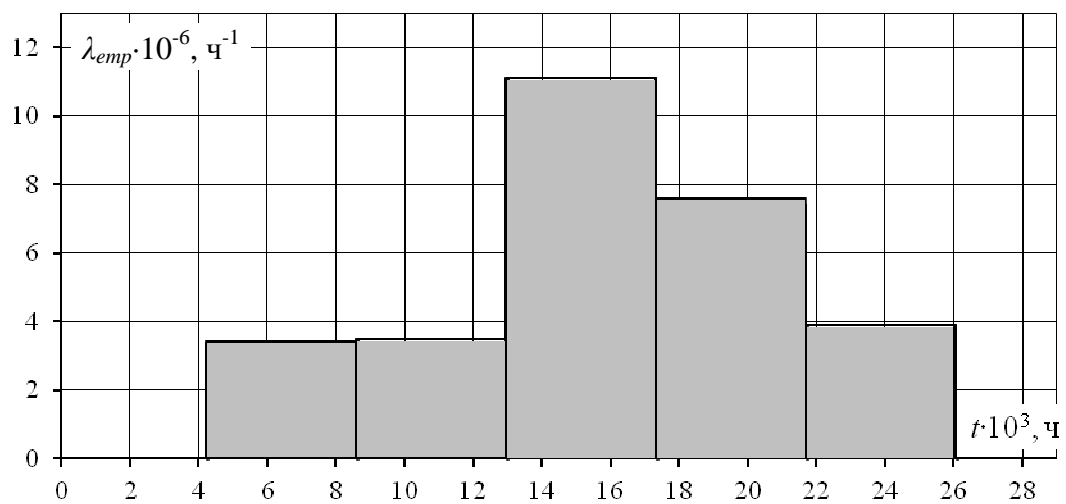
На рис. 2.8 представлены гистограммы распределения отказов по сформированным ЦВ статоров двигателей для лифтов.



a)



b)



B)

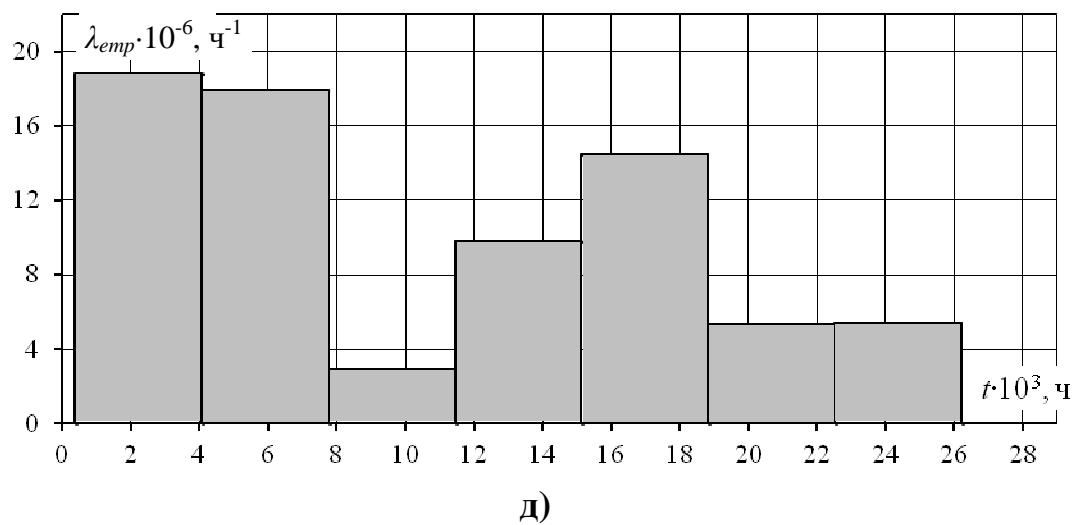
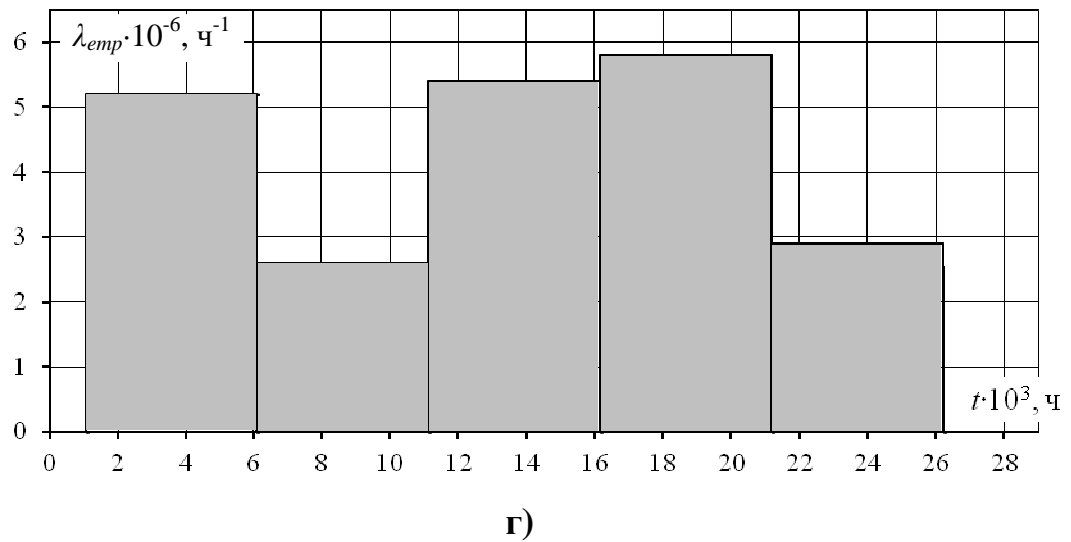


Рис. 2.8. Гистограммы интенсивности отказов статоров АДЛ, установленных в: а) 1986–1989 гг.; б) 1990–1994 гг.; в) 1995–1999 гг.; г) 2000–2004 гг.; д) 2005–2011 гг.

Гистограммы наглядно показывают увеличение интенсивности отказов статоров АДЛ, установленных в период 1986–1989 гг. (рис. 2.8.а) и уменьшение интенсивности отказов статоров АДЛ, установленных в период 2005–2011 гг. (рис. 2.8.д). На рис. 2.8.б–2.8.г визуальной определенной зависимости не прослеживается, требуются дальнейшие исследования.

Итак, при изучении информации, зафиксированной в журналах диспетчерского пункта компании обслуживающей лифты, получены следующие результаты:

1. Сформирована выборка состоящая 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. Исследуемые АДЛ установлены в пассажирских лифтах до 400 кг в жилых домах этажностью от 8 до 17 в период с 1986 г. по 2011 г. В зависимости от длительности эксплуатации выборка разбита на пять групп, изучение надежности которых проводится независимо друг от друга, так как их техническое состояние и эксплуатационная надежность различны.

2. В качестве исходных данных выбрана наработка, представляющая собой календарную продолжительность эксплуатации по причине отсутствия в обмотках АДЛ счетчиков наработки, работы в повторно-кратковременном режиме с частыми пусками и электромагнитным торможением, и невозможности определения времени их функционирования.

3. Сформирован массив исходных данных, состоящий из наработок до отказа и наработок до цензурирования статоров АДЛ. Наибольшее количество отказов АДЛ приходится на статор, поэтому для моделирования эксплуатационной надежности вероятностно-статистическим методом выбран этот узел. Полученные данные являются многократно цензурированными интервалом из-за отсутствия информации до начала наблюдений, различных моментов ввода лифтов в эксплуатацию, разделения отказов по видам и прекращения наблюдений до того как все статоры выйдут из строя.

4. Построены гистограммы распределения интенсивности отказов, учитывающие наработки до цензурирования. Функция интенсивности отказов выбрана по причине ее наглядности и информативности. Полученные гистограммы наглядно показывают, что характер изменения интенсивности отказов зависит от длительности эксплуатации АДЛ до начала наблюдений.

Дальнейшим этапом в исследовании АДЛ должен стать этап определения количественных показателей эксплуатационной надежности. Для этого необходимо разработать математическую модель, позволяющую аппроксимировать построенные гистограммы.

2.5. Математическая модель оценки эксплуатационной надежности асинхронных двигателей для лифтов по цензурированным данным

Для оценки технического состояния АДЛ и прогнозирования их эксплуатационной надежности необходима разработка математической модели (ММ), которая позволит количественно оценить показатели надежности в реальных условиях эксплуатации с помощью математического аппарата. При разработке ММ необходимо принять следующие допущения:

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

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

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

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

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

Согласно ГОСТ показатели разделяются на единичные (безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость) и комплексные (коэффициенты готовности и технического использования) [1, 30, 120]. Для оценки эксплуатационной надежности АДЛ автором выбраны следующие показатели: интенсивность отказов $\lambda(t)$, вероятность безотказной работы $P(t)$ и средняя наработка до отказа T_{cp} . При необходимости дополнительно определяется плотность распределения наработок $f(t)$ и коэффициент вариации k_{var} .

Вероятность безотказной работы, является одной из основных характеристик, по которой можно определить другие показатели. Статистически ВБР определяется по формуле:

$$P(t) = \frac{N(t)}{N}, \quad (2.6)$$

где $N(t)$ – количество АДЛ, работающих в момент времени t ; N – количество АДЛ, работающих в начале наблюдений.

Функция интенсивности отказов представляется наиболее наглядной и определяется по формуле 2.2.

Средняя наработка до отказа определяется при помощи ВБР:

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} P(t) dt. \quad (2.7)$$

Произведение функций ВБР и интенсивности отказов в результате дает функцию плотности распределения наработок:

$$f(t) = \lambda(t) \cdot P(t), \quad (2.8)$$

где $f(t)$ – плотность распределения наработок; $\lambda(t)$ – интенсивность отказов; $P(t)$ – вероятность безотказной работы.

Оперируя перечисленными показателями, можно эффективно оценивать эксплуатационную надежность АДЛ. Однако при определении параметров показателей по причине недостаточного количества отказов АДЛ вынуждены использовать наработки до цензурирования, которые хотя, и определены в теории надежности, но стоят обособленно и не учитываются методами классической теории надежности. Отличительной особенностью разработанной автором математической модели эксплуатационной надежности АДЛ, представленной в виде блоков на рис. 2.9, является математический аппарат, учитывающий наработки не отказавших двигателей.



Рис. 2.9. Алгоритм математической модели эксплуатационной надежности АДЛ

Так как ММ является основой программы для ЭВМ опишем только этапы ее разработки и особенности математического аппарата. Более подробно ММ будет представлена при ее программной реализации в следующем параграфе.

Отказы АДЛ при эксплуатации являются случайными событиями и могут быть описаны во времени при помощи различных моделей надежности [1]. Правильный выбор модели определяет максимальную достоверность расчетов, кроме того без них значительно затрудняется анализ цензурированных выборок. При разработке ММ выбор остановлен на моделях надежности наиболее часто применяемых для электротехнических изделий: экспоненциальной, Вейбулла, нормальной и логарифмически-нормальной [121]. Перечисленные модели отражают все этапы эксплуатации АДЛ.

Показатели экспоненциальной модели надежности определяются по следующим формулам [1]:

$$P(t) = \exp[-\lambda \cdot t], \quad (2.9)$$

$$f(t) = \lambda \cdot \exp[-\lambda \cdot t], \quad (2.10)$$

$$T_{cp} = \frac{1}{\lambda}, \quad (2.11)$$

$$k_{var} = 1. \quad (2.12)$$

Показатели модели надежности Вейбулла определяются по следующим формулам [1]:

$$P(t) = \exp[-\alpha \cdot t^\beta], \quad (2.13)$$

$$\lambda(t) = \beta \cdot \alpha \cdot t^{\beta-1}, \quad (2.14)$$

где α – параметр определяющий масштаб; β – параметр асимметрии.

Средняя наработка до отказа определяется при помощи гамма-функции $\Gamma\left(\frac{1}{1/k + 1}\right)$, значения которой табулированы [122]:

$$T_{cp} = \frac{\Gamma(1/\beta + 1)}{\alpha^{1/\beta}}. \quad (2.15)$$

Коэффициент вариации [110]:

$$k_{var} = \frac{\sqrt{\Gamma\left(\frac{2}{\beta} + 1\right) - \Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right)^2}}{\Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right)}. \quad (2.16)$$

Показатели нормальной модели надежности определяются по следующим формулам [1]:

$$P(t) = 1 - \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_0^\infty \exp\left[-\frac{(t - \mu)^2}{2 \cdot \sigma^2}\right] \cdot dt, \quad (2.17)$$

$$f(t) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \exp\left[-\frac{(t - \mu)^2}{2 \cdot \sigma^2}\right], \quad (2.18)$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)}, \quad (2.19)$$

$$T_{cp} = \mu, \quad (2.20)$$

$$k_{\text{var}} = \frac{\sigma}{\mu}, \quad (2.21)$$

где σ – среднее квадратическое отклонение; μ – математическое ожидание.

Показатели логарифмически-нормальной модели надежности определяются по следующим формулам [1]:

$$P(t) = 1 - \frac{1}{l_{\sigma} \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_0^t \frac{1}{t} \cdot \exp \left[-\frac{(\ln t - l_{\mu})^2}{2 \cdot l_{\sigma}^2} \right] dt, \quad (2.22)$$

$$f(t) = \frac{1}{t \cdot l_{\sigma} \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \exp \left[-\frac{(\ln t - l_{\mu})^2}{2 \cdot l_{\sigma}^2} \right], \quad (2.23)$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)}, \quad (2.24)$$

$$T_{cp} = \exp \left(l_{\mu} + \frac{l_{\sigma}^2}{2} \right), \quad (2.25)$$

$$k_{\text{var}} = \sqrt{\exp(l_{\sigma}^2) - 1}. \quad (2.26)$$

где l_{μ} и l_{σ} – математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение в логарифмическом масштабе.

Сформированный в параграфе § 2.4 и представленный в табл. 2.10-2.14 массив наработок, является исходными данными для математической модели при оценке эксплуатационной надежности статоров лифтовых двигателей. Исходные данные включают в себя наработки не только до отказа, но и до цензурирования, что является отличительной особенностью разрабатываемой ММ и учитывается используемыми методами.

Предварительно оценку параметров моделей надежности проводим методом наименьших квадратов [123], являющимся аналогом графоаналитического метода [1, 29]. Суть метода состоит в проведении прямой линии среди опытных точек, построенных в координатах, которые соответствующим образом связаны с исследуемой функцией распределения:

$$y = A + B \cdot x, \quad (2.27)$$

где A и B – параметры модели надежности; $x = f(t)$, $y = f(P)$ – функции анаморфозы, представленные в таблице 2.14 [110].

Таблица 2.14. Функции анаморфозы

Координаты	Модель надежности			
	Экспоненциальная	Вейбулла	Нормальная	Логарифмически-нормальная
y_i	$ t_i $	$\ln t_i $	gnorm	gnorm
x_i	$\Lambda(t_i)$	$\ln \Lambda(t_i)$	$ t_i $	$\ln t_i $
Примечание: gnorm – квантиль стандартного нормального распределения; t_i – наработка; $\Lambda(t_i)$ – накопленная интенсивность отказов				

Параметр экспоненциальной модели находится по следующей формуле:

$$\lambda = \frac{a}{\sum_{i=1}^N t_i}, \quad (2.28)$$

где a – количество отказавших АДЛ; N – общее число исследуемых АДЛ.

Параметры модели Вейбула (α , β) определяются по формулам (2.29) и (2.30). Параметры нормальной модели (μ , σ) определяются по формулам (2.30) и (2.31), при этом параметру σ соответствует β . Параметры логарифмически-нормальной модели надежности (l_μ , l_σ) определяются по формулам (2.30) и (2.31), только значения переменных предварительно логарифмируются, при этом параметру l_μ соответствует μ , а параметру l_σ соответствует β [124]:

$$\alpha = \exp \left[\frac{1}{N - k_0} \cdot \left(\sum_{i=1}^N x_i - \beta \cdot \sum_{i=1}^N y_i \right) \right], \quad (2.29)$$

$$\beta = \frac{(N - k_0) \cdot \sum_{i=1}^N y_i \cdot x_i - \sum_{i=1}^N y_i \cdot \sum_{i=1}^N x_i}{(N - k_0) \cdot \sum_{i=1}^N y_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N y_i \right)^2}, \quad (2.30)$$

$$\mu = \frac{1}{N - k_0} \cdot \left(\sum_{i=1}^N x_i - \sigma \cdot \sum_{i=1}^N y_i \right), \quad (2.31)$$

где k_0 – число цензурирующих наработок.

В связи с тем, что при расчете параметров моделей надежности АДЛ кроме полных наработок учтены наработки до цензурирования, полученные результаты необходимо уточнить путем определения эмпирической вероятности безотказной работы. Для этого необходимы гистограммы, построенные в § 2.4 по формуле (2.3). Эмпирическая ВБР находится по следующей формуле [110]:

$$P_{emp}(t_k) = \prod_{k=1}^k \left(\frac{1}{1 + \lambda_{emp}(t_k)} \right). \quad (2.32)$$

Уточнение параметров моделей надежности проводится методом нелинейного подбора параметров заданной функции по условию стремления к нулю разницы опытного и теоретического распределений.

Для более объективного выбора модели надежности, рассчитывается линейный коэффициент корреляции между эмпирическим и теоретическим распределением [110]:

$$cor = \frac{\sum_{k=1}^N (P_{emp}(t_k) - \bar{P}_{emp}) \cdot (P(t_k) - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{k=1}^N (P_{emp}(t_k) - \bar{P}_{emp})^2 \cdot \sum_{k=1}^N (P(t_k) - \bar{P})^2}}, \quad (2.33)$$

где \bar{P}_{emp} и \bar{P} – средние арифметические значения эмпирической ВБР и теоретической ВБР, полученной по одной из моделей надежности в соответствии с формулами (2.9), (2.13), (2.17), (2.22).

Чем ближе полученное значение коэффициента корреляции к единице, тем выше степень согласия этих распределений.

Границы доверительных интервалов определяются по следующим формулам [110]:

$$T_H = T_{cp} \cdot \left(1 - k_{\theta} \cdot \frac{k_{var}}{\sqrt{a}} \right), \quad (2.34)$$

$$T_B = T_{cp} \cdot \left(1 + k_{\theta} \cdot \frac{k_{var}}{\sqrt{a}} \right), \quad (2.35)$$

где k_{θ} – коэффициент Стьюдента для доверительной вероятности θ .

Подводя итог, отметим, что:

1. 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.

2. Проверка адекватности моделей надежности в предложенной ММ проводится с помощью линейного коэффициента корреляции, представляющего собой степень согласия эмпирического и теоретического распределений.

3. В качестве показателей выбраны вероятность безотказной работы, являющаяся одной из основных характеристик, по которой определяются другие показатели; интенсивность отказов, представляющаяся наиболее наглядной и средняя наработка до отказа. Набор перечисленных показателей является достаточным для оперативного оценивания эксплуатационной надежности АДЛ.

Приведенная математическая модель использована автором при разработке программы для ЭВМ "Оценка эксплуатационной надежности технических устройств по цензурированным данным" [109].

2.6. Программная реализация математической модели эксплуатационной надежности асинхронных двигателей для лифтов

Для оперативной оценки показателей надежности АДЛ математическую модель, разработанную в предыдущем параграфе необходимо реализовать с помощью программного обеспечения для ЭВМ [125]. С целью выбора наиболее подходящего математического редактора проведен анализ существующих программ, который позволил отсеять устаревшие программы, написанные с помощью ранних версий Бейсика, Фортрана, Паскаля. В последнее время увеличилось количество разработанных оболочек специализированных программ для решения статистических задач, предполагающих ввод исходных данных и получение результата. К ним относится пакет Statistika (компания StatSoft Ins. 2008 г.) [110]. Также с целью анализа подобных оболочек проведен патентный поиск программ для ЭВМ в таких источниках, как: официальный бюллетень Федеральной службы по интеллектуальной собственности и сайт Роспатента www.fips.ru. Сведения об отобранных для последующего анализа информационных материалах приведены в табл. 2.15.

Поиск проводился за 2009-2014 гг. по ключевым словам: закон распределения, модель надежности, оценка надежности, наработка на отказ, цензурированные данные, цензурированные выборки.

Таблица 2.15. Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

Страна выдачи, номер, дата регистрации	Правообладатель, авторы	Название, язык	Выполняемые функции
РФ, 2009614199, 12.08.2009	Томский политехнический университет, Гусев В.В., Шевчук В.П.	Программа оценки эксплуатационной надежности электрических машин по эксплуатационным данным, Delphi 2009	Статистический анализ надежности электрических машин и элементов электротехнического оборудования по цензурированным выборкам

Продолжение табл. 2.15

Страна выдачи, номер, дата регистрации	Правообладатель, авторы	Название, язык	Выполняемые функции
РФ, 2012610252, 10.01.2012	Томский политехнический университет, Ведяшкин М.В., Муравлев О.П.	Расчет эксплуатационной надежности, Delphi	Определение показателей эксплуатационной надежности электрических машин
РФ, 2012619062, 05.10.2012	Сибирский федеральный университет, Янковская Т.А., Михайленко А.В., Мигунов В.И., Демченко И.И.	Программный комплекс диагностики технического состояния горного оборудования, C++, Autodesk AutoCAD 2010, Autodesk 3D Max studio 9, EWDrow 3D ActiveX	Определение текущего технического состояния агрегатов горного оборудования, планирование их технического обслуживания и ремонта
РФ, 2012619670, 26.10.2012	ОАО "Российские железные дороги", Евсеев Д.Г., Воробьев А.А., Горский А.В., Козырев В.А., Фомин В.А., Скребков. А.В., Соколов С.А., Осипов Д.В., Копачев С.В.	Автоматизированная система технического обслуживания и ремонта локомотивов по условиям оптимизации затрат на основе фактических данных о надежности узлов и агрегатов, PHP, JavaScript	Систематизация информации о техническом состоянии оборудования локомотивов, оценка их показателей надежности, определение оптимальных сроков восстановления, прогнозирование технического состояния, ведение архивов результатов расчетов
РФ, 2012660206, 14.11.2012	Нижегородский государственный технический университет, Федоров О.В., Голубцов Н.В., Гребенюк И.И.	Остаточный ресурс электротехнических комплексов и систем, Visual Basic	Ввод данных, их анализ, определение остаточного ресурса электротехнических комплексов и систем, вывод на экран в виде таблиц
РФ, 2013610369, 09.01.2013	Волгоградский государственный технический университет, Гайдадин А.Н., Ефремова С.А.	Программа обработки результатов экспериментов методом наименьших квадратов, Turbo Delphi 2006	Расчет коэффициентов линейной функции при обработке данных, преобразование нелинейных функций к линейному виду, графическое представление данных, расчет показателей, проверка адекватности полученных зависимостей

Продолжение табл. 2.15

Страна выдачи, номер, дата регистрации	Правообладатель, авторы	Название, язык	Выполняемые функции
РФ, 2013612102, 14.02.2013	Ивановская государственная текстильная Академия, Бекташов Д.А., Блинов О.В., Крапостин А.А.	Расчет основных параметров экспоненциального закона распределения наблюдаемой случайной Величины, Visual Basic	Расчет вероятности безотказной работы, вероятности отказа, параметра распределения и интенсивности отказа экспоненциального закона распределения наблюдаемой случайной величины, построение графиков указанных зависимостей
РФ, 2013611152, 10.04.2013	Воронежский государственный аграрный университет, Кондрашова Е.В., Скрыпников А.В., Скворцова Т.В., Губарев В.Ю.	Программа статистической обработки опытных данных о надёжности сельскохозяйственных машин, Object Pascal среды Delphi 6.0	Вычисление числовых значений статистических характеристик по закону нормального распределения. Проверка соответствия между теоретическим и эмпирическим распределением показателей по критериям Колмогорова и Пирсона.
РФ, 2013610801, 20.05.2013	Воронежский государственный аграрный университет, Скрыпников А.В., Кондрашова Е.В., Скворцова Т.В., Токарев Д.Е.	Программа оценки эффективности технического обслуживания и ремонта сельскохозяйственных машин, Object Pascal среды Delphi 6.0	Вычисление комплексных показателей надёжности, показателей сохраняемости и ремонтпригодности, оценочные показатели безотказности сельскохозяйственных машин
РФ, 2013614327, 20.09.2013	Красноярский государственный медицинский университет, Наркевич А.Н., Наркевич А.А.	Доверительный интервал, версия 1.0, Borland Delphi v.7	Статистическая обработка количественных данных, не подчиняющаяся нормальному закону распределения для независимых и зависимых выборок

Наиболее близкими из программ, указанных в табл. 2.15 по возможности применения представляются: "Программа оценки эксплуатационной надежности электрических машин по эксплуатационным данным" и "Расчет эксплуатационной надежности". Эти программы также как и пакет Statistika, дают возможность расчета по уже запрограммированным алгоритмам, которых не видно на экране и не предназначены для решения новых задач. Кроме того, программа "Расчет эксплуатационной надежности" предназначена только для оценки полных выборок, что в нашем случае не применимо. АДЛ являются

высоконадежными и для получения полных выборок требуется длительное время наблюдения, поэтому принято решение при определении количественных показателей надежности учитывать цензурированные наработки, не поддающиеся обработки с помощью классической теории надежности.

Наиболее универсальными математическими редакторами можно назвать: EXEL, MAPLE, MATHEMATICA. Программирование здесь выполняется в электронных таблицах и пользователь может видеть на мониторе только исходные данные и результат, что является недостатком. Хотя они содержат некоторый набор статистических функций и могут быть использованы для анализа.

В итоге, для создания программной реализации математической модели автором выбран математический пакет MathCAD, в виду своей наглядности. С помощью встроенного редактора формул, математические выражения вводятся в виде, максимально приближенном к общему виду в офисных приложениях WINDOWS, одновременно с получением результата. Кроме того MathCAD обладает обширной библиотекой встроенных функций, необходимых для статистического и вероятностного анализа [126-128].

Для реализации математической модели (§ 2.4), алгоритм которой приведен на рис. 2.9 в редакторе MathCAD автором разработана программа "Оценка эксплуатационной надежности технических устройств по цензурированным данным" (приложение 3), работающая следующим образом:

Блок 1. Ввод исходных данных из текстового файла с расширением *.txt. Для определения количественных показателей надежности АДЛ из табл. 2.10-2.14 данные занесены с помощью текстового редактора в два столбца: первый – вектор наработок, второй – вектор индикатора, указывающего либо на наработку до отказа, либо на наработку до цензурирования. После загрузки программы указывается путь нахождения файла. 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 учитывает цензурированные наработки меньше первой наработки

до отказа. Массив с исходными данными разделен на два: наработки до отказа и наработки до цензурирований.

Блок 2. Преобразование координат исследуемой зависимости с целью приведения ее к линейному виду с помощью функций анаморфозы, приведенных в табл. 2.14.

Блок 3. Предварительная оценка параметров моделей надежности (Вейбулла, экспоненциальной, нормальной, логарифмически-нормальной) методом наименьших квадратов по формулам (2.28–2.31).

Блок 4. Построение гистограмм эмпирического распределения интенсивности отказов $\lambda_{emp}(t_k)$ и вероятности безотказной работы $P_{emp}(t_k)$ (формулы (2.3), (2.32)) с использованием оператора *hist*. При этом для нахождения эмпирического распределения вероятности безотказной работы учтены гистограммы, как отказов, так и цензурирований. Количество и ширина интервалов разбиения определены по формулам (2.3 и 2.4).

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 ВБР (формулы (2.9), (2.13), (2.17), (2.22)) с указанием искомых 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 искомых параметров в измененных обозначениях. По полученным параметрам определены математическое ожидание и коэффициент вариации в соответствии с формулами (2.11), (2.12), (2.15), (2.16), (2.20), (2.21), (2.25), (2.26). 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 $\lambda(t)$, $f(t)$ и $P(t)$ по точкам в соответствии с формулами (2.9), (2.10), (2.13), (2.14), (2.17)–(2.19), (2.22–2.24).

Блок 7. Расчет коэффициента корреляции между эмпирическим и теоретическим распределением по формуле (2.33) для более объективного выбора модели надежности, которая в предлагаемой программе заменена оператором *corr(x,y)*. Хорошему согласию распределений соответствует коэффициент корреляции со значением более 0,98 [110]. 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 заключении отметим:

1. Проведя анализ существующих программ для оценки эксплуатационной надежности электротехнических устройств, автором принято решение разработать программу, отличающуюся наглядностью используемых в ней алгоритмов и методов расчета, а также допускающую возможность ее дополнения. Перечисленные требования были выполнены в результате выбора в качестве среды программирования математического редактора MathCAD.

2. Разработана программа на основе математической модели оценки эксплуатационной надежности АДЛ (§ 2.5) по цензурированным данным, которая обеспечивает выполнение следующих функций:

– построение гистограмм эмпирического распределения наработок до отказа и до цензурирования;

- расчет параметров моделей надежности (экспоненциальной, Вейбула, нормальной, логарифмически-нормальной) методом наименьших квадратов с последующим их уточнением;

- построение теоретических зависимостей моделей надежности;

- расчет математического ожидания и коэффициентов вариации;

- выбор модели надежности с помощью коэффициента корреляции, определяющего степень согласия между эмпирическим и теоретическим распределением наработок;

- определение границ доверительных интервалов.

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.

3. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014618241 (приложение 4).

2.7. Моделирование эксплуатационной надежности статоров асинхронных двигателей для лифтов

Чтобы эффективно управлять надежностью АДЛ, необходимо иметь представление о техническом состоянии их узлов в каждый конкретный момент времени. Выполнить поставленную задачу можно, определив показатели надежности, такие как интенсивность отказов, вероятность безотказной работы и среднюю наработку до отказа. Собранные эксплуатационная информация и приведенная в табл. 2.10-2.14 состоит из наработок до отказа и цензурированных наработок, поэтому она не поддается обработке с помощью классических методов теории надежности. Для расчета количественных показателей надежности статоров АДЛ была использована разработанная автором программа для ЭВМ "Оценка эксплуатационной надежности технических устройств по цензурированным данным" [109], позволяющая исследовать специфические выборки. При этом массив исходных данных для каждой из групп АДЛ (табл. 2.9) рассматривается в программе независимо друг от друга. Проведенное разбиение увеличивает точность расчетов и определяет эксплуатационную надежность статоров АДЛ в различные периоды эксплуатации. Указанная программа позволяет получить параметры следующих моделей надежности: нормальной, экспоненциальной, Вейбулла и логарифмически-нормальной.

В качестве результата на рис. 2.10–2.14 приведены гистограммы эмпирических распределений и теоретические функции интенсивности отказов статоров АДЛ для каждой из групп при различных моделях надежности.

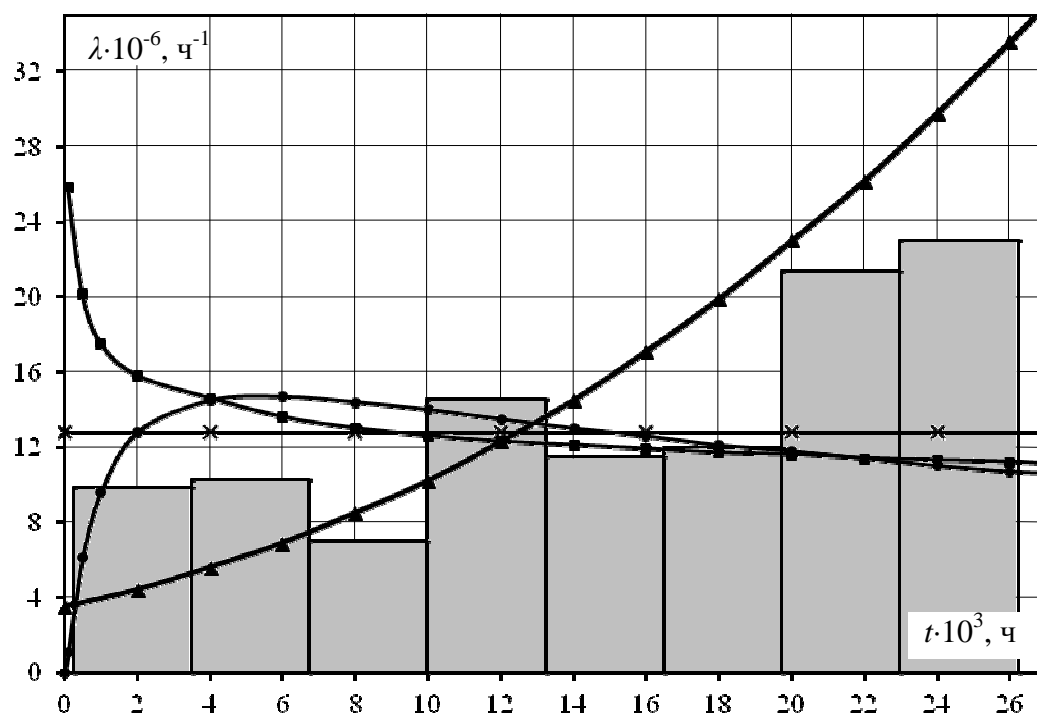


Рис. 2.10. Интенсивность отказов статоров АДЛ, установленных в 1986–1989 гг. при моделях надежности: ▲ – нормальной; ● – логарифмически-нормальной; × – экспоненциальной; ■ – Вейбулла.

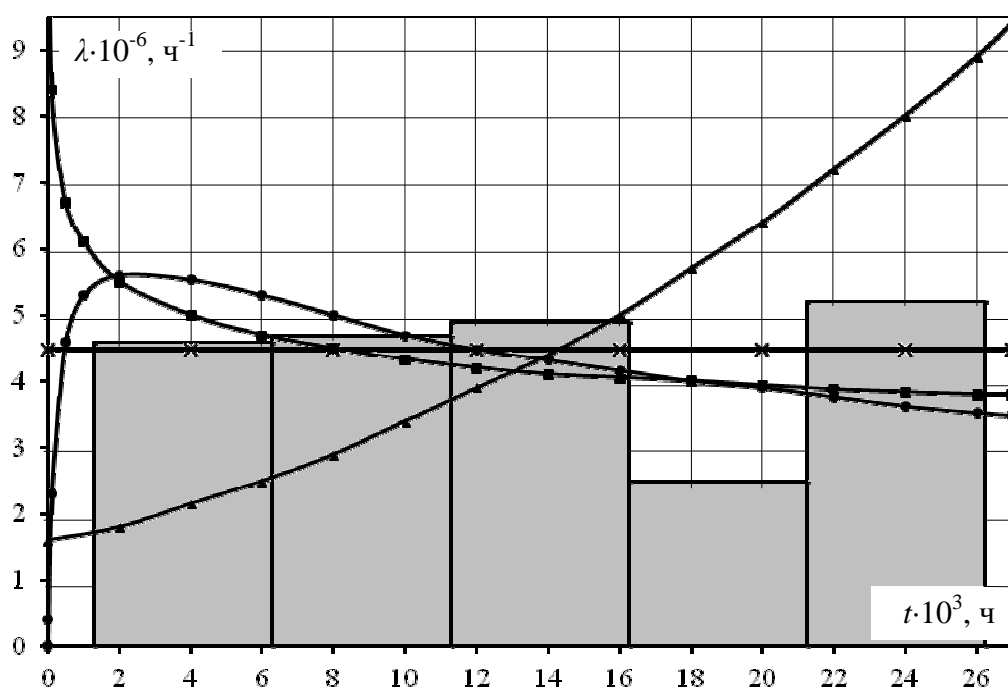


Рис. 2.11. Интенсивность отказов статоров АДЛ, установленных в 1990–1994 гг. при моделях надежности: ▲ – нормальной; ● – логарифмически-нормальной; × – экспоненциальной; ■ – Вейбулла.

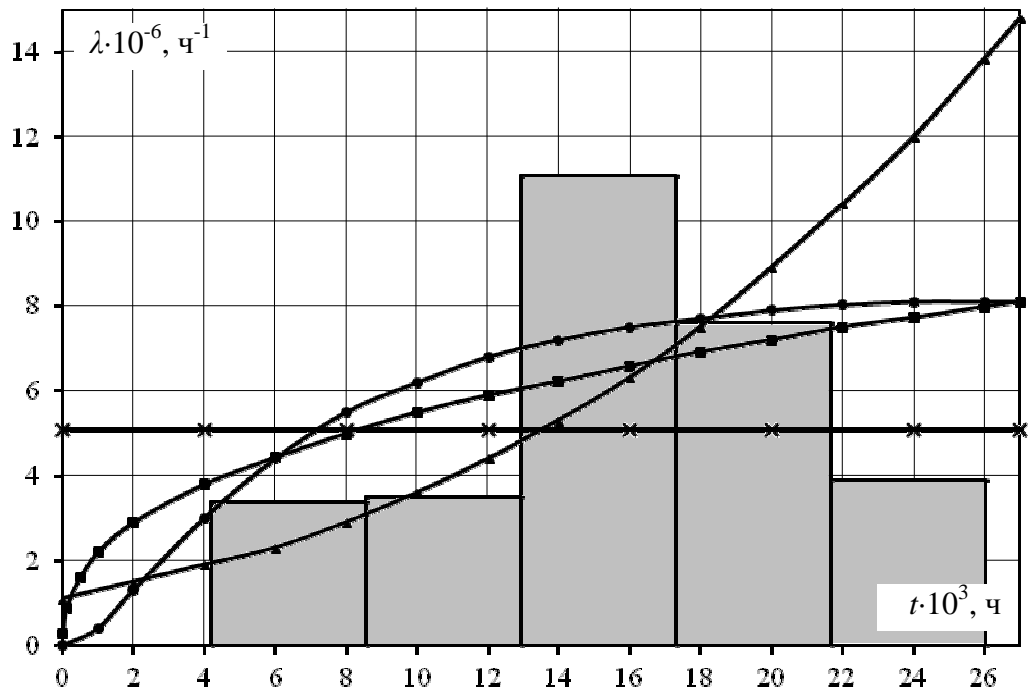


Рис. 2.12. Интенсивность отказов статоров АДЛ, установленных в 1995–1999 гг. при моделях надежности: ▲ – нормальной; ● – логарифмически-нормальной; × – экспоненциальной; ■ – Вейбулла.

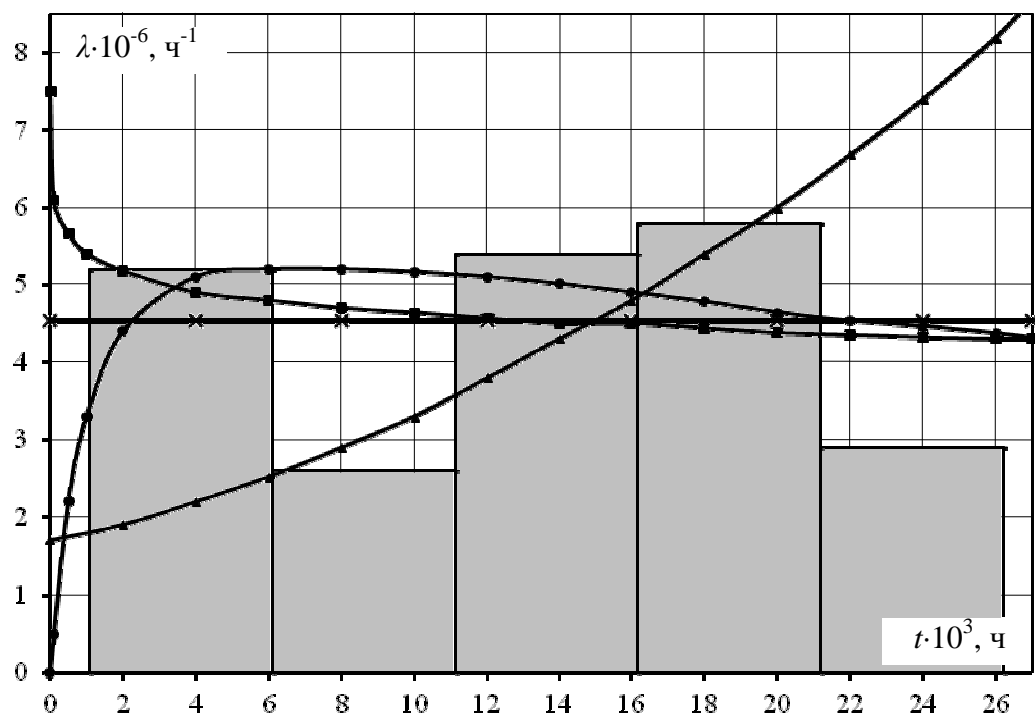


Рис. 2.13. Интенсивность отказов статоров АДЛ, установленных в 2000–2004 гг. при моделях надежности: ▲ – нормальной; ● – логарифмически-нормальной; × – экспоненциальной; ■ – Вейбулла.

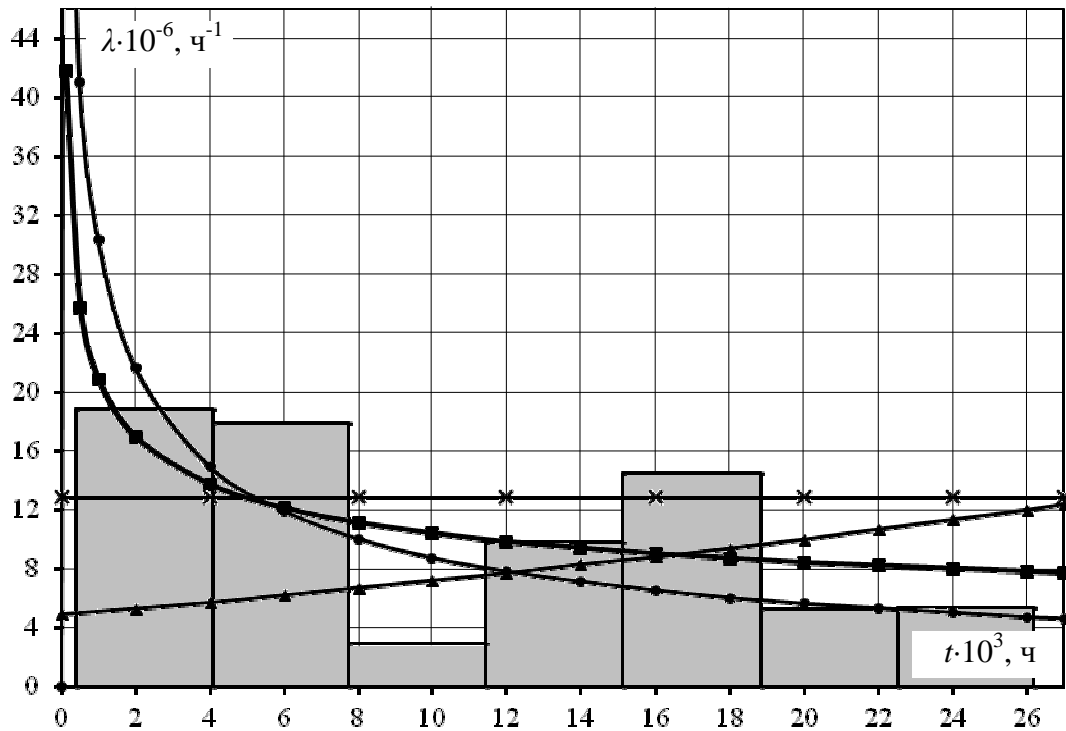


Рис. 2.14. Интенсивность отказов статоров АДЛ, установленных в 2005–2011 гг. при моделях надежности: ▲ – нормальной; ● – логарифмически-нормальной; × – экспоненциальной; ■ – Вейбулла.

Функции интенсивности отказов, представленные на рис. 2.10–2.14 наглядно позволяют судить и о законе распределения и физике деградационного процесса статоров. Каждая из групп АДЛ имеет различную длительность эксплуатации до начала наблюдений, соответственно техническое состояние магнитопровода и изоляции статорных обмоток тоже различно и описывается определенной моделью надежности. Выбор модели осуществляется линейным коэффициентом корреляции с помощью программы для ЭВМ [109], результаты расчета, которого представлены в табл. 2.16.

Таблица 2.16. Коэффициенты корреляции

№ группы	Период установки, гг.	Коэффициент корреляции			
		Модель надежности			
		нормальная	экспоненциальная	логарифмически-нормальная	Вейбулла
1	1986–1989	0,994	0,986	0,978	0,982
2	1990–1994	0,973	0,996	0,995	0,995
3	1995–1999	0,953	0,985	0,984	0,982
4	2000–2004	0,979	0,992	0,991	0,991
5	2005–2011	0,971	0,987	0,984	0,989

Табл. 2.16 определяет выбор модели надежности для каждой группы АДЛ. Коэффициент корреляции группы АДЛ № 1 максимален для нормальной модели надежности, групп № 2, 3, 4 – для экспоненциальной модели надежности и группы № 5 – для модели надежности Вейбулла. Средняя наработка до отказа и параметры выбранных моделей надежности представлены в табл. 2.17.

Таблица 2.17. Средняя наработка до отказа и параметры выбранных моделей надежности статоров АДЛ

Период установки, гг.	Модель							
	нормальная			Вейбулла			экспоненциальная	
	μ , ч	σ , ч	$T_{ср}$, ч	α	β	$T_{ср}$, ч	$\lambda_{СТ} \cdot 10^{-6}$, ч ⁻¹	$T_{ср}$, ч
1986–1989	32771	16596	32771	–	–	–	–	–
1990–1994	–	–	–	–	–	–	4,48	223404
1995–1999	–	–	–	–	–	–	5,09	196600
2000–2004	–	–	–	–	–	–	4,53	220653
2005–2011	–	–	–	0,00024	0,69729	195596	–	–

На рис. 2.10 наглядно просматривается быстрое увеличение интенсивности отказов, коэффициент корреляции при этом максимален для нормальной модели надежности, а значит можно уверенно судить о разрушении изоляции обмоток статора и магнитопровода двигателей, установленных в 1986-1989 гг. Напротив, на рис. 2.14 интенсивность отказов уменьшается с течением времени и, согласно вычисленным коэффициентам корреляции, подчиняется закону распределения

Вейбулла. Учитывая, что двигатели из этой группы либо находились в эксплуатации незначительное время до начала наблюдений, либо были установлены во время наблюдений, а также наиболее частый выход их из строя по причине срабатывания ДТЗ, относим период их работы к периоду приработки.

Для АДЛ начало работы, которых совпадает с 1990-2004 гг. (рис. 2.11-2.13), функция интенсивности отказов носит постоянный характер, и говорит о внезапности произошедших отказов, то есть о нормальном периоде эксплуатации.

В заключении отметим, что с помощью разработанной автором программы для ЭВМ "Оценка эксплуатационной надежности технических устройств по цензурированным данным" на основании эксплуатационных наблюдений проведено моделирование эксплуатационной надежности статоров АДЛ как наиболее аварийного узла. В результате моделирования:

1. Построены гистограммы эмпирических распределений и теоретические функции интенсивности отказов статоров групп АДЛ, имеющих различный период эксплуатации до начала их исследования, для моделей надежности: нормальной, экспоненциальной, Вейбулла и логарифмически-нормальной.

2. Используя коэффициент корреляции, определяющий степень согласия между эмпирическим и теоретическим распределением наработок выбрана конкретная модель надежности для каждой из указанных групп наиболее точно характеризующая эксплуатационную надежность статоров входящих в нее двигателей. Определены параметры выбранных моделей.

3. Анализ наиболее наглядного количественного показателя – функции интенсивности отказов позволил сделать вывод о том, что группы АДЛ на момент исследования находятся на различных этапах эксплуатации. Функция интенсивности отказов новых двигателей подчиняется закону распределения Вейбулла, количество отказов постепенно уменьшается, свидетельствуя о периоде приработки. У двигателей, относящихся к группе эксплуатируемой более 21 года, прослеживается быстрое увеличение интенсивности отказов по нормальному закону распределения, то есть происходит старение изоляции. Остальные группы АДЛ находятся на периоде нормальной работы, где функция интенсивности

отказов носит постоянный характер в соответствии с экспоненциальной моделью надежности.

4. При сравнении средних наработок до отказа статоров исследованных групп АДЛ выявлено, что с вероятностной точки зрения для всех двигателей, установленных в период 1990–2011 гг. они равны. Исключение составляют статоры двигателей, установленных в период 1986–1989 гг., имеющие в 6 раз меньшую среднюю наработку до отказа.

Полученные результаты исследования предназначены для прогнозирования эксплуатационной надежности АДЛ, а также совершенствования их системы организации технического обслуживания и ремонта.

2.8. Выводы

Огромной трудностью в оценке и повышении эксплуатационной надежности АДЛ является недостаточное количество информации от их отказов, несмотря на огромный парк пассажирских лифтов. Выход из сложившейся ситуации можно найти, совершенствуя методики расчета количественных показателей надежности. Основными предъявляемыми требованиями являются возможность учета наработок, не отказавших АДЛ (цензурированных данных) и обработки выборок большого объема. ЦВ предполагают громоздкие вычисления и для оперативной оценки показателей ЭН необходимо применение прикладных математических пакетов для ЭВМ, которые в свою очередь должны обладать простотой использования, а также наглядностью вычислений и полученных результатов. Только так можно оценить надежность АДЛ, выявить недостатки их эксплуатации, откорректировать периодичность и трудоемкость текущего обслуживания и ремонта, подготовить материально-техническую базу, уменьшить длительность простоя пассажирских лифтов и снизить финансовые затраты.

1. Для проведения исследования автором собрана и проанализирована эксплуатационная информация на протяжении трех лет 446 идентичных по устройству и назначению тихоходных пассажирских лифтов грузоподъемностью до 400 кг., установленных в жилых домах этажностью от 9 до 17 в г. Томске в период с 1986 г. по 2011 г. Сформирована выборка, состоящая 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. В зависимости от длительности эксплуатации выборка разбита на пять групп.

2. С помощью системного анализа упорядочены элементы пассажирского лифта и определен порядок расчета его надежности, что представлено в виде дерева целей, имеющего иерархическую структуру. Методом экспертных оценок определены КОВ каждого элемента дерева целей, то есть их вклад в достижение общей цели, которой является обеспечение надежности, работоспособности и

безопасности функционирования пассажирского лифта. Также получено распределение отказов на всех уровнях дерева целей, которое показывает, что надежность лифта в значительной степени определяется надежностью лебедки. На АДЛ приходится 10% отказов лебедки, эти отказы приводят к длительному простою пассажирских лифтов и являются наиболее дорогими по исправлению, как показал экспертный опрос.

3. Получены данные по видам отказов АДЛ, которые позволяют судить о наиболее аварийных из них: статор – 41,8 %, подшипниковые устройства – 8,1 %. Кроме того часто срабатывали датчики температурной защиты (38,4 %), обеспечивая статорам дальнейшую работу.

4. 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.

5. В качестве показателей выбраны вероятность безотказной работы, являющаяся одной из основных характеристик, по которой определяются другие показатели; интенсивность отказов, представляющаяся наиболее наглядной и средняя наработка до отказа.

6. 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.

7. Сформирован массив исходных данных, состоящий из наработок до отказа и наработок до цензурирования статоров АДЛ. Полученные данные являются многократно цензурированными интервалом из-за отсутствия информации до начала наблюдений, различных моментов ввода лифтов в эксплуатацию, разделения отказов по видам и прекращения наблюдений до того как все статоры выйдут из строя.

8. Проведено моделирование эксплуатационной надежности статоров АДЛ, как наиболее аварийного узла:

Построены гистограммы эмпирических распределений и теоретические функции интенсивности отказов статоров групп АДЛ, имеющих различный период эксплуатации до начала их исследования, для моделей надежности: нормальной, экспоненциальной, Вейбулла и логарифмически-нормальной.

Используя коэффициент корреляции, определяющий степень согласия между эмпирическим и теоретическим распределением наработок выбрана конкретная модель надежности для каждой из указанных групп наиболее точно характеризующая эксплуатационную надежность статоров входящих в нее двигателей. Определены параметры выбранных моделей.

Анализ наиболее наглядного количественного показателя – функции интенсивности отказов позволил сделать вывод о том, что группы АДЛ на момент исследования находятся на различных этапах эксплуатации. Функция интенсивности отказов новых двигателей подчиняется закону распределения Вейбулла, количество отказов постепенно уменьшается, свидетельствуя о периоде приработки. У двигателей, относящихся к группе эксплуатируемой более 21 года, прослеживается быстрое увеличение интенсивности отказов по нормальному

закону распределения, то есть происходит старение изоляции. Остальные группы АДЛ находятся на периоде нормальной работы, где функция интенсивности отказов носит постоянный характер в соответствии с экспоненциальной моделью надежности.

При сравнении средних наработок до отказа статоров исследованных групп АДЛ выявлено, что с вероятностной точки зрения для всех двигателей, установленных в период 1990–2011 гг. они равны. Исключение составляют статоры двигателей, установленных в период 1986–1989 гг., имеющие в 6 раз меньшую среднюю наработку до отказа.

Полученные результаты исследования предназначены для прогнозирования эксплуатационной надежности АДЛ, а также совершенствования их системы организации технического обслуживания и ремонта.

3. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ ЛИФТОВ

3.1. Общие сведения прогнозирования эксплуатационной надежности асинхронных двигателей для лифтов

Надежность любой электрической машины закладывается на стадии проектирования, но с момента изготовления в ней начинают протекать процессы, приводящие к деградации, то есть ее работоспособность с течением времени постепенно ухудшается. Причем скорость изменения технического состояния различна у различных электрических машин. Исчерпывающе проанализировать изменение работоспособности можно только в каждом конкретном случае для определенного типа ЭМ или их узлов в определенных условиях эксплуатации.

Наибольшее внимание в настоящее время уделяется эксплуатационной надежности, особенно ЭМ, находящихся на этапе близком к выработке своего ресурса. Определенные с помощью теории надежности количественные показатели несут информацию о состоянии объекта в настоящем времени и о его функционировании в прошлом. Определением технического состояния на некоторый промежуток времени вперед занимается теория прогнозирования, ставшая достаточно актуальной. Она неразрывно связана с теорией надежности, так как решение ее вопросов невозможно без определения количественных показателей надежности различными методами [25]. Прогнозирование нацелено на предотвращение отказов объектов путем обоснованного планирования сроков и объемов технических мероприятий, поддерживающих их работоспособное состояние. Осуществление прогнозирования позволяет:

- сократить время восстановления объектов путем выявления узлов, работоспособность которых существенно изменится в последующий период эксплуатации и возможности подготовки запасных частей;

- планировать виды, сроки и объемы ремонтно-восстановительных работ объектов, корректируя этим уровень технического состояния всей системы, в состав которой они входят;

- ограничить количество обслуживающего персонала в связи с определением состояния объектов на некоторый период времени вперед.

Прогнозирование может базироваться на различных принципах и, соответственно, проводиться различными методами, которые разделяются в основном на методы аналитического прогнозирования, методы вероятностного прогнозирования и статистическую классификацию [129].

Аналитические методы предполагают, что результат прогноза и контролируемые параметры имеют одинаковую размерность. Изменение параметра во времени описывается с помощью аналитического выражения, контролируется в процессе эксплуатации и сравнивается с прогнозируемым значением.

Целью вероятностных методов является определение вероятности выхода прогнозируемых характеристик за определенные границы. Такое прогнозирование осуществляется в случае, когда необходимо только сохранение работоспособного состояния объекта или в случае сложности описания его контролируемых параметров. Существенным дополнением вероятностного прогнозирования являются ускоренные испытания, которые используются в основном при отсутствии статистической информации об отказах, а также позволяют с достаточной точностью и оперативностью определить "слабые" узлы при изменении конструкции существующих либо при изготовлении вновь спроектированных двигателей.

При статистической классификации исследуемый объект относят к какому-либо классу с заранее определенными характеристиками, то есть сравнивают с эталоном. Преимуществом этих методов является отсутствие необходимости непрерывной диагностики, достаточно однократного контроля параметров.

Необходимым инструментом, дополняющим прогнозирование, является техническая диагностика, позволяющая определять реальное состояние объекта в

любой дискретный момент времени, находить дефекты на ранних стадиях их развития и проводить корректировку данных, полученных при обработке статистической информации.

На стадии эксплуатации применимы любые из описанных методов прогнозирования. Однако выбор конкретного метода в основном определяется требуемой точностью, существующей информацией об объекте исследования и возможностью его контроля.

Особенное значение прогнозирование имеет при эксплуатации АДЛ, так как они являются высоконадежными двигателями, и не имеется возможности зафиксировать отказы, произошедшие в течение всей эксплуатации. Поэтому для обеспечения и повышения надежности АДЛ необходимо, имея эксплуатационную информацию лишь на небольшом промежутке времени, осуществить прогнозирование закономерностей изменения их технического состояния на протяжении всего функционирования. Кроме того исследование АДЛ показало отсутствие какой-либо эксплуатационной информации кроме момента и причин их отказов, что не позволяет применить аналитические методы и методы статистической классификации. Прогнозирование эксплуатационной надежности АДЛ вероятностными методами должно основываться на математической модели оценки эксплуатационной надежности статоров АДЛ.

Несмотря на то, что лифтовые асинхронные двигатели проектируются на длительный срок функционирования, по причине различных скрытых дефектов и недостатков эксплуатации они могут выходить из строя значительно раньше. В § 2.2 была получена структурная схема пассажирского лифта, имеющая иерархическую структуру и определяющая порядок расчета надежности его элементов (рис. 2.3). В состав этой схемы входит асинхронный двигатель лебедки. Удельный вес надежности АДЛ в обеспечении надежности лифта в целом, определенный методом экспертных оценок, составляет 12,4 %, занимая второе место из всего перечня его элементов. При этом учитывалось не только количество отказов двигателей, но и количество времени, необходимое для их восстановления, а также стоимость ремонта. В свою очередь, анализ отказов

редукторных лебедок показал, что отказы АДЛ составляют 10 % [130]. Поэтому прогнозирование эксплуатационной надежности АДЛ является актуальной задачей. Дальнейшее разбиение элементов происходит на узлы и детали. Детально АДЛ представляется в виде блоков: обмоток и магнитопровода статора, короткозамкнутой обмотки и магнитопровода ротора, подшипниковых устройств, вала, станины, подшипниковых щитов, подшипниковых крышек. Каждый из блоков обладает своим уровнем вероятности безотказной работы, от которых зависит общая надежность двигателя. Для более точного определения уровня эксплуатационной надежности АДЛ прогнозирование технического состояния необходимо проводить для каждого из блоков независимо друг от друга.

Следующим шагом является определение типа соединения этих блоков в части их надежности. Известны три основных типа соединения: последовательное, параллельное и параллельно-последовательное [63]. Согласно методу "слабых звеньев" любой объект может быть представлен одним из этих вариантов соединения блоков. Если отказ любого из блоков приводит к остановке объекта, то соединение является последовательным. Параллельное соединение довольно часто встречается при резервировании, дублировании и в электрических схемах.

Итак, АДЛ в части надежности необходимо рассматривать как последовательную схему, ВБР системы при которой в общем виде определяется по теореме умножения вероятностей [33]:

$$P_{TY}(t) = P_1(t) \cdot P_2(t) \cdot \dots \cdot P_n(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t), \quad (3.1)$$

где $P_i(t)$ – ВБР i -го элемента в соединении; n – количество элементов.

Учитывая разбиение АДЛ на узлы и детали формула (3.1) представляется в следующем виде:

$$P_{АДЛ}(t) = P_{СТ}(t) \cdot P_{КЗ}(t) \cdot P_{ПВ}(t) \cdot P_B(t) \cdot P_C(t) \cdot P_{Щ}(t) \cdot P_K(t), \quad (3.2)$$

где $P_{СТ}(t)$ – ВБР обмотки и магнитопровода статора; $P_{КЗ}(t)$ – ВБР короткозамкнутой обмотки и магнитопровода ротора; $P_{ПВ}(t)$ – ВБР

подшипниковых устройств; $P_B(t)$ – ВБР вала; $P_C(t)$ – ВБР станины; $P_{Щ}(t)$ – ВБР подшипниковых щитов; $P_K(t)$ – ВБР подшипниковых крышек.

Распределение отказов по узлам исследованных АДЛ показало, что наиболее аварийным из них является статор, вышедший из строя в 41,8 % случаях. Кроме того достаточно часто срабатывали датчики температурной защиты (38,4 %), обеспечивая статорам дальнейшую работу. Другим узлом определяющим работоспособность АДЛ представляются подшипниковые устройства (8,1 %). Отказы остальных узлов составляют незначительное количество. В исследованных двигателях были обнаружены дефекты выходного конца вала в двух случаях, однократно – дефект замка крышки подшипника и заклинивание ротора, а также дисбаланс ротора у трех двигателей. Учитывая изложенное, сделан вывод о необходимости исследования ВБР статора и подшипниковых устройств, ВБР остальных блоков следует приравнять единице. После преобразования формулы (3.2) получено:

$$P_{АДЛ}(t) = P_{СТ}(t) \cdot P_{ПУ}(t). \quad (3.3)$$

Модель "слабых звеньев" АДЛ представляет собой блок-схему с последовательным соединением элементов, приведенную на рис. 3.1.

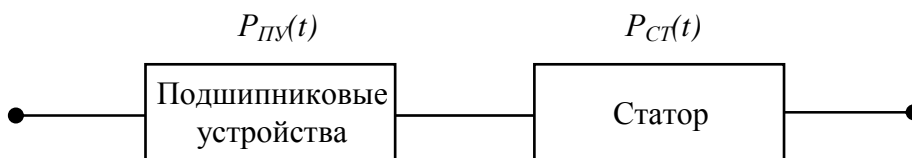


Рис. 3.1. Блок-схема эксплуатационной надежности АДЛ

Подведем итог:

1. Прогнозирование эксплуатационной надежности АДЛ нацелено на выявление потенциальных отказов их узлов и деталей и проведение своевременных технических мероприятий до возникновения фактического отказа. Кроме того, при эксплуатации АДЛ не имеется возможности зафиксировать отказы, произошедшие в течение всей эксплуатации, так как двигатели работают

на протяжении длительного промежутка времени, измеряемого иногда десятилетиями. Поэтому для обеспечения и повышения надежности АДЛ необходимо, имея эксплуатационную информацию лишь на небольшом промежутке времени, осуществить прогнозирование надежности на протяжении всего функционирования.

2. Существующие методы прогнозирования разделяются на методы аналитического прогнозирования, методы вероятностного прогнозирования и статистическую классификацию, которые базируются на различных принципах. Анализ перечисленных методов показал, что для прогнозирования надежности АДЛ наиболее целесообразно применение вероятностных методов в виду наличия ограниченной эксплуатационной информации (даты отказов и их причины). Причем прогнозирование эксплуатационной надежности АДЛ должно быть основано на математической модели оценки их эксплуатационной надежности.

3. Для более точного определения уровня эксплуатационной надежности произведено разбиение АДЛ на блоки, обладающие своей вероятностью безотказной работы, определяемой независимо друг от друга. Соединение блоков в части надежности представляет собой последовательную схему, в состав которой входят обмотки статора с магнитопроводом и подшипниковые устройства. ВБР остальных узлов и деталей было принято решение приравнять единице из-за незначительного количества их отказов, а ВБР двигателя в целом определять как произведение наиболее "слабых" блоков.

3.2. Математическая модель прогнозирования эксплуатационной надежности статоров асинхронных двигателей для лифтов

Рассматривая работоспособность ЭМ от начала их работы до полного списания, можно выделить три периода их эксплуатации: период приработки, когда интенсивность отказов постепенно снижается, при котором происходит отбраковка изделий, имеющих какие-либо конструктивные или технологические дефекты, период нормальной эксплуатации, имеющий только случайные отказы и период старения, когда количество отказов быстро увеличивается [1, 33]. Наиболее длительным является период нормальной эксплуатации. Функция изменения интенсивности отказов во времени на протяжении всего периода эксплуатации изделия, носит название "кривой жизни". Наибольшее влияние на надежность АДЛ оказывает статор (80,2 %), состоящий из обмоток большой и малой скорости и сердечника. Отличительной особенностью статора от остальных узлов и деталей является невозможность оперативной его замены. В результате выхода статора из строя проводится капитальный ремонт АДЛ, приводящий к длительному простоем лифтов. Из чего следует, что знание "кривой жизни" статоров дает возможность разработки эффективной системы технического обслуживания и ремонта, зависящей от состояния АДЛ, повышая этим их надежность.

Для решения поставленной задачи автором разработана математическая модель прогнозирования эксплуатационной надежности статоров АДЛ, алгоритм которой представлен на рис. 3.2. Данная модель основана на математической модели оценки эксплуатационной надежности АДЛ по цензурированным выборкам, представляющей собой математические формулы и связи между ними.

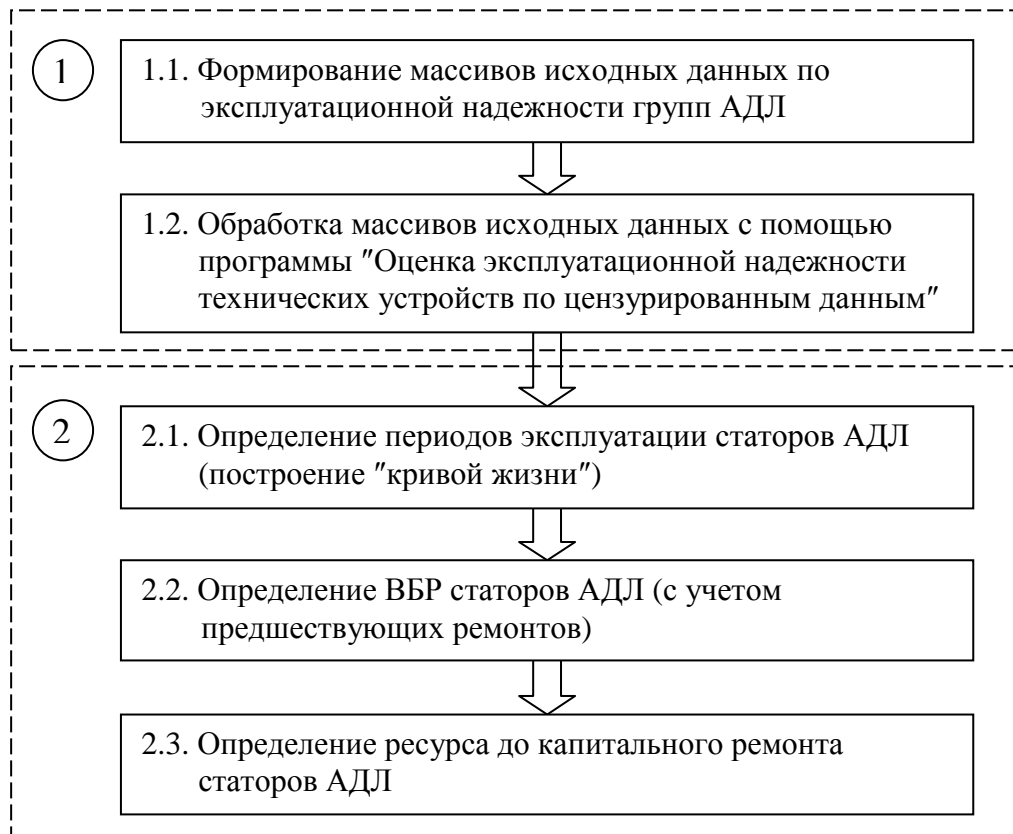


Рис. 3.2. Алгоритм математической модели прогнозирования эксплуатационной надежности статоров АДЛ

Первый блок ММ прогнозирования представляет собой сбор и обработку эксплуатационной информации, что автором выполнено в главе 2. Получен массив исходных данных в результате сбора эксплуатационной информации выборки, состоящей из 446 двухскоростных двигателей 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, установленных в пассажирских лифтах до 400 кг в жилых домах этажностью от 9 до 17 в период с 1986 г. по 2011 г. и разбит на группы (табл. 2.9) в зависимости от длительности работы до начала наблюдений. Определены количественные показатели моделей надежности (нормальной, экспоненциальной, Вейбулла и логарифмически-нормальной) для статоров групп АДЛ [131] с помощью разработанной автором программы "Оценка эксплуатационной надежности технических устройств по цензурированным данным" [109]. Выбрана конкретная модель надежности для каждой из указанных групп наиболее точно характеризующая эксплуатационную

надежность статоров входящих в нее двигателей с использованием коэффициента корреляции, определяющего степень согласия между эмпирическим и теоретическим распределением наработок.

Полученные результаты показывают, на каком этапе эксплуатации находится каждая группа АДЛ, но не несут информации об ее состоянии в будущем. На этот вопрос отвечает второй блок ММ прогнозирования эксплуатационной надежности. Функции интенсивности отказов статоров групп АДЛ, представленные на рис. 2.7–2.11 подчиняются различным законам распределения (табл. 3.1).

Таблица 3.1. Функция интенсивности отказов статоров АДЛ

Период эксплуатации, лет	Номер группы	Модель надежности	Функция интенсивности отказов
1-6	5	Вейбулла	$\lambda_{CT}(t) = 0,00024 \cdot 0,69729 \cdot t^{0,69729-1}$
6-11	4	Экспоненциальная	$\lambda_{CT}(t) = 4,53 \cdot 10^{-6}$
11-16	3		$\lambda_{CT}(t) = 5,09 \cdot 10^{-6}$
16-21	2		$\lambda_{CT}(t) = 4,48 \cdot 10^{-6}$
От 21	1	Нормальная	$\lambda_{CT}(t) = \frac{\sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{(t-32771)^2}{2 \cdot 16596^2}\right]}{16596 \cdot \Phi\left(\frac{t-32771}{16596 \cdot \sqrt{2}}\right)}$
Примечание: $\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-x^2) dx$ – интеграл вероятности (интеграл Лапласа)			

В табл. 3.1 группы АДЛ расположены в порядке длительности их эксплуатации до начала наблюдений. Указанные в таблице функции объединены в одних координатных осях, при этом впервые в практике эксплуатации получена "кривая жизни" статоров АДЛ не встречающаяся ранее в литературе (рис. 3.3). Вид данной кривой приводится неоднократно, но количественные значения найдены ранее были неизвестны [131].

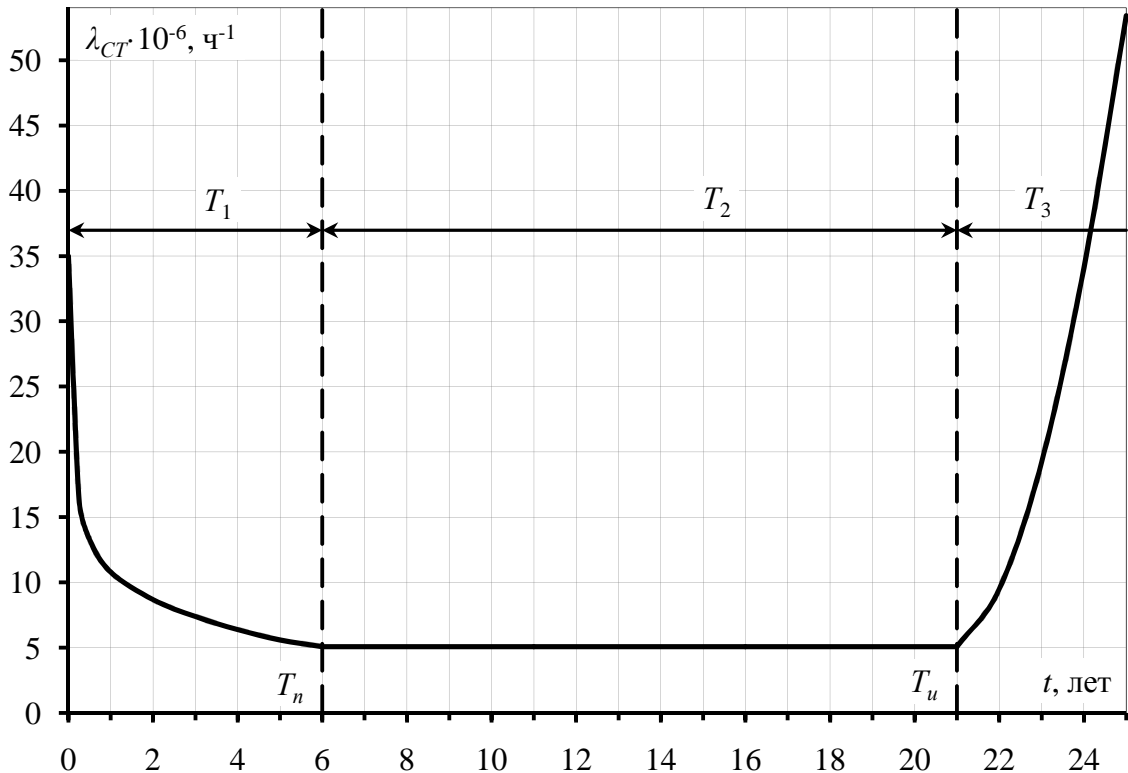


Рис. 3.3. "Кривая жизни" статоров АДЛ.

Возможность для объединения дает однотипность конструкции АДЛ и одинаковые условия их эксплуатации. "Кривая жизни" составлена из пяти участков функции интенсивности отказов длительностью по три года. Недостающие интервалы между ними построены при помощи моделей надежности предыдущего интервала.

Итак, от даты введения АДЛ в эксплуатацию до 6 лет (точка T_n), функция интенсивности отказов изменяется в соответствии с моделью надежности Вейбулла, как показало исследование группы двигателей, установленных в 2005-2011 гг. Периодам эксплуатации 6-11, 11-16, 16-21 лет соответствует экспоненциальная модель надежности, определенная для статоров двигателей, установленных в 2000-2004, 1995-1999, 1990-1994 гг. соответственно. После 21 года эксплуатации (точка T_u) функция интенсивности отказов изменяется по нормальному закону распределения, определенному при помощи статоров АДЛ, установленных в 1986-1989 гг.

Рис. 3.3 наглядно демонстрирует, что время эксплуатации статоров АДЛ имеет три явно выраженных периода: T_1 – период приработки, T_2 – период нормальной работы и T_3 – период износа. Период приработки статоров АДЛ характеризуется высокой интенсивностью отказов, которая постепенно падает. Отказы в этот период вызваны технологическими и производственными недостатками. Большинство дефектов обнаруживаются и устраняются в процессе приемосдаточных испытаний, тем не менее, часть статоров АДЛ оказывается со скрытыми дефектами, которые вызывают отказы в первый период эксплуатации. Высокая интенсивность отказов объясняется 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, что в данном случае рассмотрено как отказ. Отказы первого периода не влияют на надежность АДЛ в последующие периоды их использования.

Период нормальной эксплуатации T_2 следует за периодом приработки, в течение которого происходят внезапные (случайные) отказы статоров АДЛ, не имеющие какой-либо определенной закономерности. Такие отказы случаются из-за межвиткового и межфазного замыканий в обмотках статора, обрыва их проводников, нарушения паяных или сварных контактов, разрушения соединений, аварий, возникших на подающих подстанциях, коротких замыканий в распределительных сетях, грозовых и коммутационных возмущений, неравномерности распределения нагрузки по фазам. Согласно рис. 3.3 к периоду нормальной работы относится участок 6-21 года эксплуатации. В этом случае имеет место наиболее низкий уровень интенсивности отказов приблизительно постоянной величины на уровне $5,0 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$. Функция интенсивности отказов носит экспоненциальный характер.

После 21 года эксплуатации двигателей наступает период износа статоров, имеющий отказы возрастающей интенсивности. В течение трех лет интенсивность отказов увеличивается почти в шесть раз и достигает $33 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$.

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.

Функция интенсивности отказов наглядно представляет, какие физические процессы протекают в изоляции статоров АДЛ. Не смотря на то, что старение изоляции происходит только после 21 года эксплуатации, отказы двигателей происходят гораздо раньше. Кроме того данные с помощью которых были определены длительности периодов приработки нормальной эксплуатации и старения, являются цензурированными. До начала наблюдений большинство исследуемых двигателей подвергалось различным видам ремонтных работ и техническому обслуживанию. Поэтому совместно с интенсивностью отказов необходимо исследовать вероятность безотказной работы статоров АДЛ (табл. 3.2) в соответствии с блоком 2.2 ММ прогнозирования эксплуатационной надежности статоров АДЛ (рис. 3.2).

Таблица 3.2. ВБР и средняя наработка до отказа статоров АДЛ

Период эксплуатации, лет	Модель надежности	Функция интенсивности отказов	T_{cp} , ч
1-5	Вейбулла	$P_{CT}(t) = \exp[-0,00024 \cdot t^{0,69729}]$	195596
6-10	Экспоненциальная	$P_{CT}(t) = \exp[-4,53 \cdot t]$	273213
11-15		$P_{CT}(t) = \exp[-5,09 \cdot t]$	292960
16-20		$P_{CT}(t) = \exp[-4,48 \cdot t]$	363564
От 21	Нормальная	$P_{CT}(t) = 1 - \frac{1}{16596 \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_0^{\infty} \exp\left[-\frac{(t-32771)^2}{2 \cdot 16596^2}\right] \cdot dt$	216731

Из табл. 3.2 видно, что функция ВБР, также как и функция интенсивности отказов состоит из участков, изменяющихся в соответствии с различными моделями надежности.

В табл. 3.2 приведены средние наработки до отказа T_{cp} для каждого из участков эксплуатации, приведенные к общему началу отсчета времени в соответствии с "кривой жизни". Средняя наработка на отказ для периода приработки не несет практической информации, так как этот период является непродолжительным, а дальнейшее распределение отказов подчиняется другим законам. Проведем анализ T_{cp} , определенных на участках 6-11 лет и от 21 года, так как они являются наиболее информативными.

С момента времени T_n начинается нормальный период эксплуатации АДЛ, где T_{cp} – средняя наработка до первого отказа. При достижении времени эксплуатации значения T_n начинает происходить старение изоляции статора, T_{cp} в этом случае является техническим ресурсом двигателей и обозначается T_p . Для удобства переведя время работы в годы, получено, что $T_p=24,7$ лет, $T_{cp}=31,2$ года (рис. 3.3). Средняя наработка до первого отказа статоров АДЛ на нормальном периоде эксплуатации больше их технического ресурса в период износа, это значит, что при низкой интенсивности отказов T_{cp} может достигать больших величин и показывает, только насколько надежны статоры АДЛ в период нормального функционирования. Соответственно, высокую безотказность работы можно получить только на интервале значительно меньшем, чем T_{cp} .

Для определения времени надежного функционирования статоров АДЛ в одних осях с "кривой жизни" построена функция ВБР (рис. 3.4).

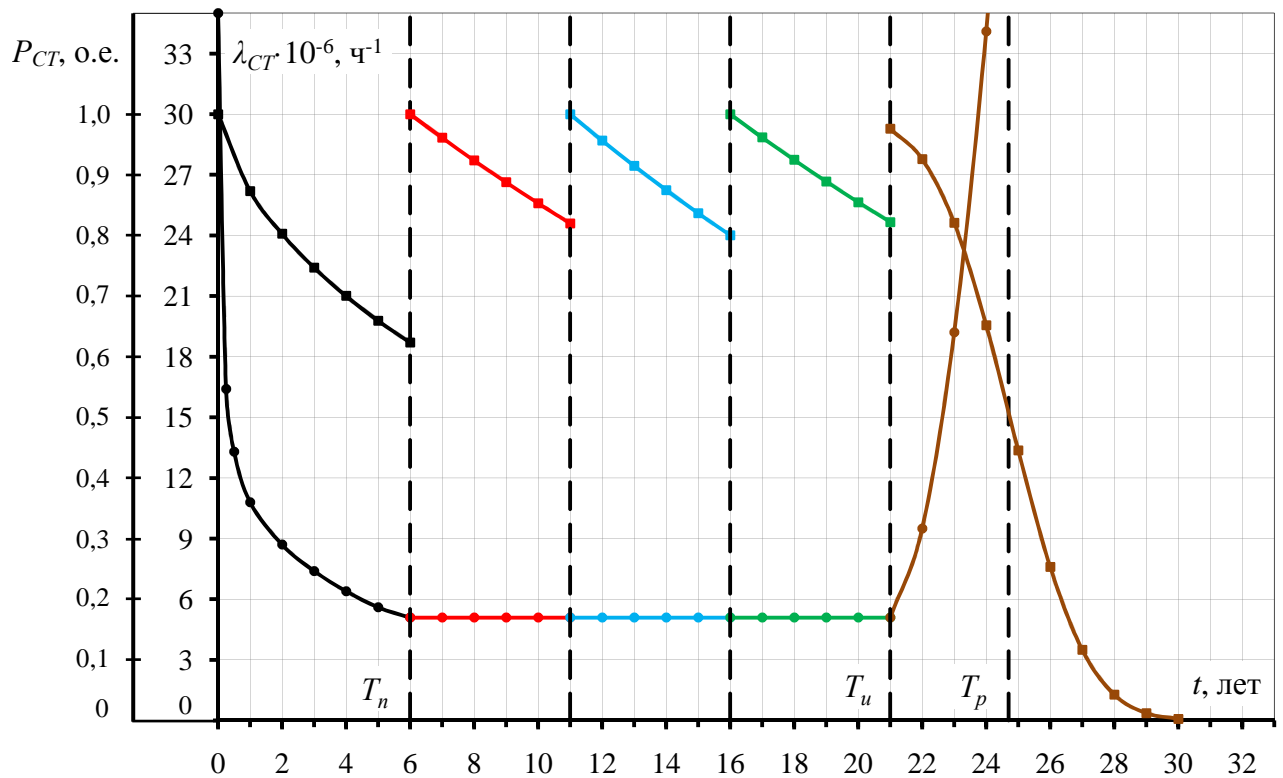


Рис. 3.4. Функции надежности статоров АДЛ: ■ – ВБР;

● – интенсивность отказов

На рис. 3.4 видно, что ВБР имеет пилообразную форму. Такой вид получен по причине допущений положенных в основу ММ оценки эксплуатационной надежности статоров АДЛ. До начала наблюдений проведен текущий ремонт двигателей, поэтому на начальном этапе каждая из исследуемых групп имеет максимальную ВБР. На рис. 3.5 представлено изменение функции ВБР статоров АДЛ без применения системы ТОиР, то есть каждый последующий участок функции ВБР, приведенной в табл. 3.2, построен с учетом предыдущего.

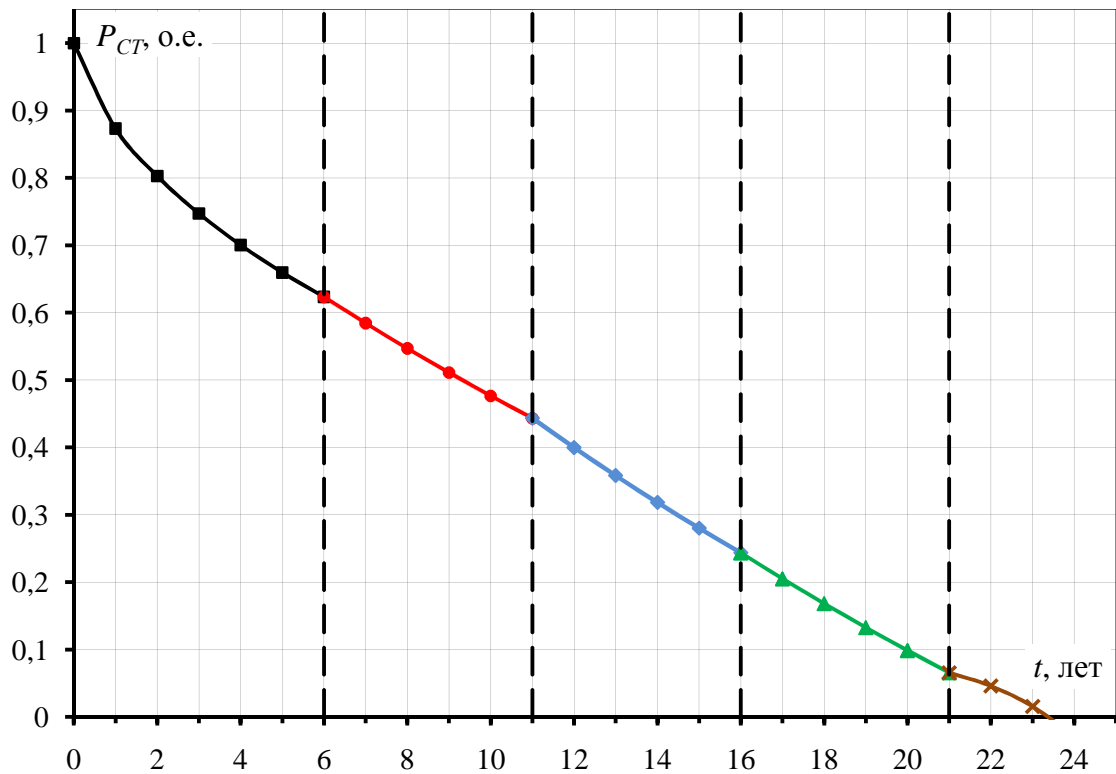


Рис. 3.5. Изменение ВБР статоров АДЛ без применения системы ТОиР

Как видно из рис. 3.5 при достижении временем эксплуатации величины $T_p=24,7$ лет вероятность безотказной работы равна нулю, что не допустимо.

В соответствии с блоком 2.3 ММ прогнозирования эксплуатационной надежности, следующим этапом является исследование долговечности, которая представляет собой свойство двигателя сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при определенной системе ТОиР [1]. Долговечность объектов характеризуется средним ресурсом до капитального ремонта и для статоров в общем случае определяется по формуле:

$$T_{pk} = \sum_{i=1}^n P_{CT}(t_i) \cdot \Delta t, \quad (3.4)$$

где $P_{CT}(t_i)$ – ВБР статора в течение наработки t_i ; n – номер интервала времени Δt , после которого значение ВБР становится меньше 0,2.

Учитывая формулы, приведенные в табл. 3.2 ресурс до капитального ремонта статоров АДЛ определяется по формуле [1]:

$$\begin{aligned}
T_{pk} = & \left(\sum_{i=1}^5 \exp[-0,00024 \cdot t_i^{0,69729}] \right) \cdot \Delta t + \left(\sum_{i=6}^{10} \exp[-4,53 \cdot t_i] \right) \cdot \Delta t + \\
& + \left(\sum_{i=11}^{15} \exp[-5,09 \cdot t_i] \right) \cdot \Delta t + \left(\sum_{i=16}^{20} \exp[-4,48 \cdot t_i] \right) \cdot \Delta t + \\
& + \left(\sum_{i=21}^n \left(1 - \frac{1}{16596 \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_0^{\infty} \exp \left[\left(-\frac{(t_i - 32771)^2}{2 \cdot 16596^2} \right) \right] \cdot dt \right) \right) \cdot \Delta t
\end{aligned} \quad (3.5)$$

С учетом того, что ВБР статоров через 17 лет ниже 0,2, формула (3.5) приобретает следующий вид:

$$\begin{aligned}
T_{pk} = & \left(\sum_{i=1}^5 \exp[-0,00024 \cdot t_i^{0,69729}] \right) \cdot \Delta t + \left(\sum_{i=6}^{10} \exp[-4,53 \cdot t_i] \right) \cdot \Delta t + \\
& + \left(\sum_{i=11}^{15} \exp[-5,09 \cdot t_i] \right) \cdot \Delta t + \left(\sum_{i=16}^{17} \exp[-4,48 \cdot t_i] \right) \cdot \Delta t = 76844 \text{ ч.}
\end{aligned} \quad (3.6)$$

Средний ресурс до капитального ремонта статоров лифтовых асинхронных двигателей 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.

На начальном этапе исследования в качестве наработки была принята календарная продолжительность эксплуатации по причине отсутствия в АДЛ счетчиков наработки. Поэтому в нашем случае понятия средний ресурс и средний срок службы являются тождественными. В табл. 1.3 приведены показатели, установленные в технических условиях на лифтовые асинхронные двигатели [49]. Средний срок службы до капитального ремонта составляет 8 лет, а средний срок службы – 15 лет. Полученные показатели надежности и долговечности показали, что возможна эксплуатация АДЛ за пределами, установленных в технической документации сроков, но для их надежной работы в течение промежутка времени $0-T_p$ необходимо проведение технических мероприятий, поддерживающих работоспособное состояние их статоров.

Резюмируя, отметим:

1. Разработана математическая модель прогнозирования эксплуатационной надежности статоров АДЛ, основанная на математической модели оценки эксплуатационной надежности статоров АДЛ по цензурированным выборкам, представляющей собой математические формулы и связи между ними. Полученная модель позволяет определить периоды эксплуатации статоров АДЛ (построить "кривую жизни"), определить ВБР на каждом периоде и определить ресурс до капитального ремонта АДЛ.

2. С помощью ММ прогнозирования впервые в практике эксплуатации получена "кривая жизни" статоров АДЛ не встречающаяся ранее в литературе. Вид данной кривой приводится неоднократно, но количественные значения найдены ранее были неизвестны. Полученная зависимость наглядно показывает периоды эксплуатации статоров АДЛ: приработки, нормальной работы и износа.

Большое значение в период приработки имеет его длительность. Для АДЛ интенсивность отказов в течение первого года уменьшается в несколько раз, в течение второго – падает плавно, приближаясь к постоянному значению, на промежутке времени от 2 до 6 лет интенсивность отказов меняется незначительно ($3,5 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$), на такую же величину, что и на протяжении второго года эксплуатации. С точностью, достаточной в дальнейшем для разработки системы ТОиР, следует считать длительность периода приработки, равной двум годам. Период нормальной эксплуатации следует за периодом приработки, в течение которого происходят отказы статоров 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 $33 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$.

3. 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. Также рассчитан средний ресурс до капитального ремонта при отсутствии системы ТОиР, который составил 8,7 лет. Таким образом, имеется возможность увеличения срока службы АДЛ сверх установленного в его документации (15 лет) путем проведения технических мероприятий, поддерживающих работоспособное состояние их статоров.

4. Принимая во внимание, что статор АДЛ является наиболее аварийным узлом (80,2 %), с точностью достаточной в дальнейшем для разработки системы ТОиР полученную "кривую жизни" статоров можно считать "кривой жизни" АДЛ в целом.

3.3. Прогнозирование надежности и долговечности подшипниковых устройств асинхронных двигателей для лифтов

Подшипниковые устройства являются вторым из узлов (после статора), определяющих надежность асинхронных лифтовых двигателей (рис. 3.1). Но, несмотря на то, что уровень их отказов выше по сравнению с другими узлами (8,1 %), абсолютное количество зафиксированных отказов в исследуемой выборке составляет незначительное количество (приложение 2). Прогнозирование эксплуатационной надежности объектов вероятностно-статистическим методом невозможно без достаточной информации об отказах, поэтому определение показателей надежности подшипников при механическом износе и долговечности, применяемой в них смазки, принято решение проводить по стандартным методикам [17]. С целью выполнения поставленной задачи выбрана методика, изложенная в ОСТ [16] и включающая в себя расчет сил приложенных к валу двигателя (рис. 3.6).

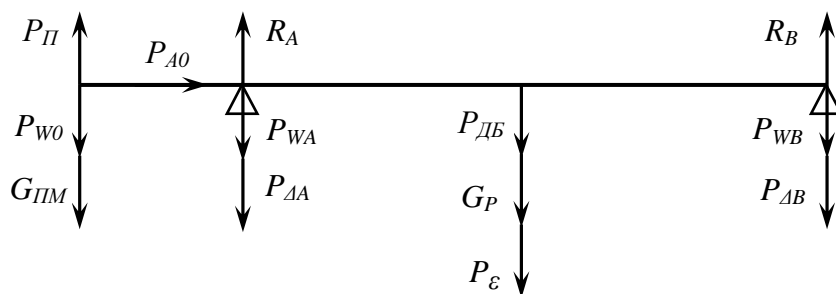


Рис. 3.6. Схема приложения сил на вал АДЛ: P_{Π} – сила реакции передачи; P_{W0} – вибрационные нагрузки внешней среды; $G_{ПМ}$ – вес полумуфты; P_{A0} – усилие пружины осевого поджатия; R_A – радиальная нагрузка на опору А; P_{WB} – вибрационная нагрузка на подшипник опоры А; $P_{\Delta A}$ – сила, возникающая в защемлении тел качения между кольцами подшипника опоры А; $P_{ДБ}$ – сила дисбаланса; G_P – вес ротора; P_{ε} – сила одностороннего магнитного тяжения; R_B – радиальная нагрузка на опору В; P_{WB} – вибрационная нагрузка на подшипник

опоры В; P_{AB} – сила, возникающая в защемлении тел качения между кольцами подшипника опоры В

Предложенная 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 [1, 33, 62].

Расчет подшипниковых устройств проведен автором на примере лифтовых двигателей 5АН160S4/16НЛБ и 5АН160S6/18НЛБ, со стороны привода и с противоположной стороны которых установлены подшипники типа 76-180309С9ШЗУ (6310.2RS.P63QE6) [132]. Устройство подшипниковых узлов представлено на рис. 3.7.

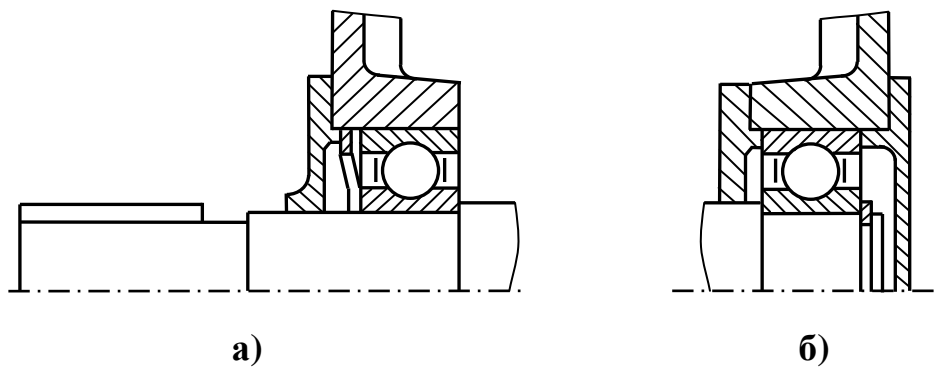


Рис. 3.7. Подшипниковые узлы двигателей 5АН160S4/16НЛБ и 5АН160S6/18НЛБ: а) со стороны привода; б) со стороны противоположной приводе

Со стороны привода между подшипником и крышкой установлено пружинное кольцо (рис. 3.7.а). Для снижения вибрации подшипник со стороны противоположной приводе – зажат (рис. 3.7.б).

Согласно формуле (3.1) при последовательной схеме соединения в части надежности ВБР подшипниковых устройств определяется как:

$$P_{ПУ}(t) = P_{ИЗ}(t) \cdot P_{СМ}(t), \quad (3.6)$$

где $P_{ИЗ}(t)$ – ВБР подшипников по износу; $P_{СМ}(t)$ – ВБР смазки подшипников.

В свою очередь ВБР подшипников по износу определяется по следующей формуле:

$$P_{ИЗ}(t) = P_{МА}(t) \cdot P_{БА}(t) \cdot P_{МВ}(t) \cdot P_{БВ}(t), \quad (3.7)$$

где $P_{МА}(t)$ – ВБР подшипника опоры А по износу при эксплуатации на малой скорости; $P_{БА}(t)$ – ВБР подшипника опоры А по износу при эксплуатации на большой скорости; $P_{МВ}(t)$ – ВБР подшипника опоры В по износу при эксплуатации на малой скорости; $P_{БВ}(t)$ – ВБР подшипника опоры В по износу при эксплуатации на большой скорости.

Исходные данные для расчета показателей надежности подшипниковых устройств двигателей 5АН160S4/16НЛБ и 5АН160S6/18НЛБ определены с помощью конструкторских чертежей и ГОСТов [133-137] и приведены в табл. 3.3.

Таблица 3.3. Исходные данные для расчета показателей надежности подшипниковых устройств двигателей 5АН160S4/16НЛБ и 5АН160S6/18НЛБ

Параметр	Обозначение	Величина			
		5АН160S4/16		5АН160S6/18	
		2p=4	2p=16	2p=6	2p=18
1	2	3	4	5	6
Величина воздушного зазора АДЛ, мм	δ_n	0,5		0,45	
Номинальный наружный диаметр ротора, мм	D_a	173		192,1	
Длина сердечника ротора, мм	L_a	139		144	
Частота вращения ротора, об/мин	n	1500	375	1000	333
Номинальная мощность, кВт	P_2	3,55	0,88	3	1
Верхнее и нижнее предельное отклонение диаметра вала под подшипник, мкм	$X_{1A,B}$	18			
	$X_{2A,B}$	2			
Поле допуска наружного диаметра ротора, мкм	l_p	80			
Поле допуска внутреннего диаметра сердечника статора, мкм	l_{cm}	140		145	
Величина и поле допуска расстояния от упорного торца ступицы подшипникового щита до торца замка станины, мм	$L_0^{\pm l_0}$	$33^{+0,32}$			
Величина и поле допуска расстояния между замками станины, мм	$L_4^{\pm l_4}$	$339_{-0,3}$			

Продолжение табл. 3.3

1	2	3	4	5	6
Величина и поле допуска расстояния между упорными заплечиками вала, мм	$L_5^{\pm l_5}$	352 _{-0,3}			
Торцевое биение замка станины, мм	$\delta_{cA,B}$	0,05			
Радиус замка станины, мм	$R_{cA,B}$	142			
Торцевое биение замка подшипникового щита, мм	$\delta_{цA,B}$	0,05			
Радиус замка подшипникового щита, мм	$R_{цA,B}$	142			
Радиальное биение посадочного места под подшипник относительно замка подшипникового щита, мм	$\varepsilon_{0A,B}$	0,025			
Ширина волнистой пружины (заготовки в радиальном направлении), мм	b_n	7,5			
Толщина пружины, мм	h_n	0,8			
Число волн волнистой пружины	n_n	6			
Средний диаметр пружины, мм	D_{cp}	91,5			
Высота волны пружины, мм	h_{en}	3,5			
Модуль упругости, Н/мм ²	E	2,1·10 ⁵			
Сила тяжести ротора с валом, Н	G_p	318		229	
Масса ротора с валом, кг	m_p	31,8		22,9	
Расстояние от опор А и В до центра тяжести вала соответственно, мм	L_2	180		187,5	
	L_3	197		189,5	
Расстояние между опорами А и В	L_{AB}	377			
Расстояние от опоры А до точки приложения внешней радиальной нагрузки, мм	L_1	81,5			
Радиус муфты, мм	r	70			
Вес муфты, Н	G_n	34,3			
Класс точности балансировки	e_ω	2,5			
Нижнее и верхнее предельные отклонения внутреннего диаметра подшипника, мкм	$X_{3A,B}$	-10			
	X_{4A}	0,3			
	X_{4B}	0			
Внутренний диаметр подшипника, мм	$d_{A,B}$	45			
Наружный диаметр подшипника, мм	$D_{A,B}$	100			
Максимальный и минимальный радиальный зазор подшипника до монтажа, мкм	$g_{2\max A,B}$	36			
	$g_{2\min A,B}$	18			
Торцевое биение внутреннего кольца подшипника, мкм	$\Delta TBK_{A,B}$	10			
Торцевое биение заплечиков вала со стороны опор А и В, мкм	$\Delta TB_{A,B}$	16			

Продолжение табл. 3.3

1	2	3	4	5	6
Величина и поле допуска ширины кольца подшипника, мм	$B_n^{\pm l_b}$	$25_{-0,12}^0$			
Внешние вибрационные нагрузки, м/с ²	G_θ	5			
Высота неровностей дорожек качения подшипника, мкм	$\left(\sqrt{R_{a1}^2 + R_{a2}^2}\right)_{A,B}$	0,125			
Радиальное биение дорожек качения подшипника, мкм	$\Delta p.б.б_{A,B}$	10			
Допустимая овальность цапфы, мкм	$\rho_{цA,B}$	10			
Высота неровностей, мкм	R_z	3,2			
Допустимая овальность внутреннего кольца подшипника, мкм	$\rho_{нA,B}$	10			
Математическое ожидание динамической грузоподъемности подшипника, Н	$M(C)_{шA,B}$	52700			
Статистическая грузоподъемность подшипника, Н	$C_{0A,B}$	30000			
Диаметр окружности, проходящий по центрам тел качения подшипника, мм	$D_{0A,B}$	72,5			
Наружный диаметр внутреннего кольца подшипника, мм	$d_{вA,B}$	55,04			
Радиусы дорожек качения соответственно наружного и внутреннего кольца подшипника, мм	$r_{нA,B}$	8,99			
	$r_{вA,B}$				
Число шариков подшипника	$Z_{A,B}$	8			
Диаметр шариков подшипника, мм	$D_{шA,B}$	17,463			
Максимальное и минимальное значение коэффициента безопасности	$k_{\delta \max}$	1,5			
	$k_{\delta \min}$	1			
Постоянный коэффициент для смазки подшипника, коэффициент срока службы смазки и среднеквадратичное отклонение срока службы смазки	$A_{см}$	1			
	$B_{см}$	1500			
	$\sigma_{см}$	4000			
Допустимый уровень вибрации подшипника, м/с ²	$W_{1A,B}$	3,78			
Коэффициент зависимости от 2р	k	0,15			
Коэффициент передачи муфты	k_n	0,3			
Коэффициент загрузки двигателя	φ_{\max}	1			
	φ_{\min}				
Рассеивание превышения температуры, %	$\sigma_{tA,B}^*$	5			
Коэффициент для смазочной пленки	k_0	70			
Разность температур между наружным и внутренним кольцом, °С	Δt	10	8	8	8

По данным табл. 3.3 проведен расчет ВБР подшипников по механическому износу, результаты расчета в зависимости от наработки приведены в табл. 3.4.

Таблица 3.4. ВБР подшипников двигателей 5АН160S4/16НЛБ и 5АН160S6/18НЛБ

$t, \text{ч}$	5АН160S4/16НЛБ				5АН160S6/18НЛБ			
	$P_{МА}(t)$	$P_{БА}(t)$	$P_{МВ}(t)$	$P_{БВ}(t)$	$P_{МА}(t)$	$P_{БА}(t)$	$P_{МВ}(t)$	$P_{БВ}(t)$
5000	0,999999	0,999996	0,999908	0,999710	0,999999	0,999997	0,999858	0,999678
10000	0,999999	0,999984	0,999840	0,999498	0,999999	0,999987	0,999763	0,666462
15000	0,999998	0,999963	0,999780	0,999309	0,999997	0,999971	0,999679	0,999274
20000	0,999996	0,999935	0,999724	0,999133	0,999994	0,999949	0,999603	0,999102
25000	0,999994	0,999898	0,999671	0,998966	0,999991	0,999921	0,999532	0,998941
30000	0,999992	0,999853	0,999620	0,998806	0,999987	0,999886	0,999465	0,998788
35000	0,999988	0,999800	0,999571	0,998651	0,999983	0,999844	0,999400	0,998642
40000	0,999985	0,999738	0,999523	0,998501	0,999977	0,999797	0,999338	0,998501
45000	0,999981	0,999669	0,999476	0,998355	0,999972	0,999743	0,999277	0,998365
50000	0,999976	0,999591	0,999431	0,998213	0,999965	0,999683	0,999219	0,998232
55000	0,999971	0,999505	0,999386	0,998073	0,999957	0,999616	0,999162	0,998103
60000	0,999966	0,999411	0,999343	0,997936	0,999949	0,999543	0,999106	0,997977
65000	0,999960	0,999309	0,999300	0,997802	0,999941	0,999464	0,999052	0,997854
70000	0,999954	0,999199	0,999258	0,997669	0,999931	0,999378	0,998998	0,997733
75000	0,999947	0,999080	0,999216	0,997539	0,999921	0,999286	0,998946	0,997614
80000	0,999940	0,998983	0,999175	0,997410	0,999910	0,999188	0,998894	0,997498
85000	0,999932	0,998819	0,999135	0,997283	0,999898	0,999083	0,998843	0,997383
90000	0,999924	0,998976	0,999095	0,997158	0,999886	0,998972	0,998793	0,997170
95000	0,999915	0,998525	0,999055	0,997034	0,999873	0,998855	0,998744	0,997159
100000	0,999906	0,998365	0,999016	0,996912	0,999859	0,998731	0,998696	0,997049

В табл. 3.4 представлены значения ВБР в зависимости от наработки. На начальном этапе исследований было принято решение в качестве наработки использовать календарное время эксплуатации, по причине отсутствия в АДЛ счетчиков наработки, а соответственно невозможности учета реального времени функционирования, то есть срок службы. АДЛ предназначены для работы в повторно-кратковременном режиме с частыми пусками и электромагнитным торможением. Продолжительность включения согласно технической документации [48, 49] на большой скорости составляет 40÷60 %, на малой – 12÷15 %, поэтому полученные результаты приведены к сроку службы при наиболее нагруженном режиме работы допустимой документацией, то есть при работе на большой скорости продолжительностью 60 % и на малой скорости

продолжительностью 15 % и представлены для 5АН160S4/16НЛБ на рис. 3.8, для 5АН160S6/18НЛБ – на рис. 3.9.

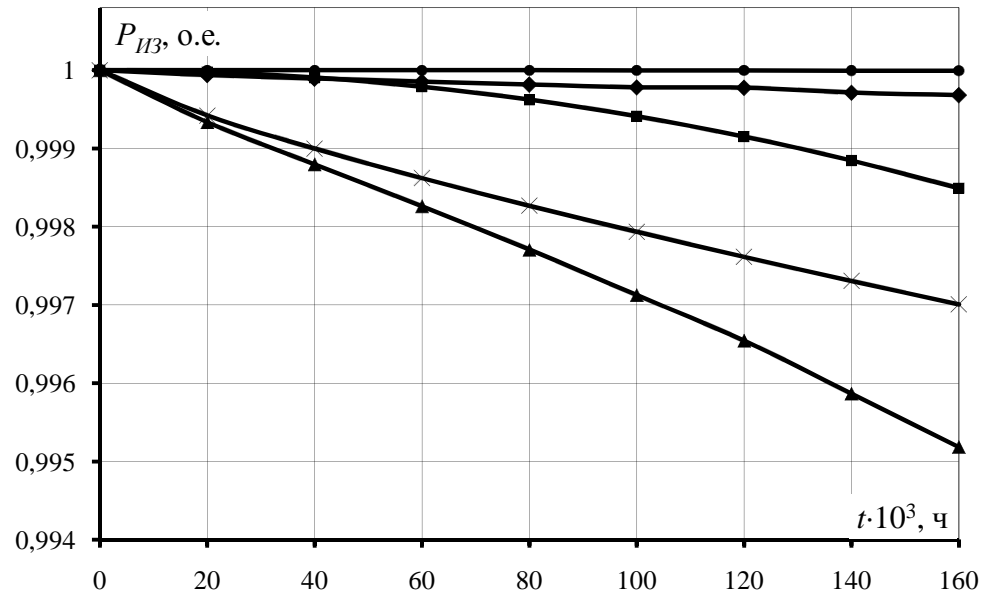


Рис. 3.8. ВБР подшипников 5АН160S4/16НЛБ: ■ – со стороны привода на большой скорости; ● – со стороны привода на малой скорости; × – со стороны противоположной приводе на большой скорости; ◆ – со стороны противоположной приводе на малой скорости; ▲ – результирующая по износу.

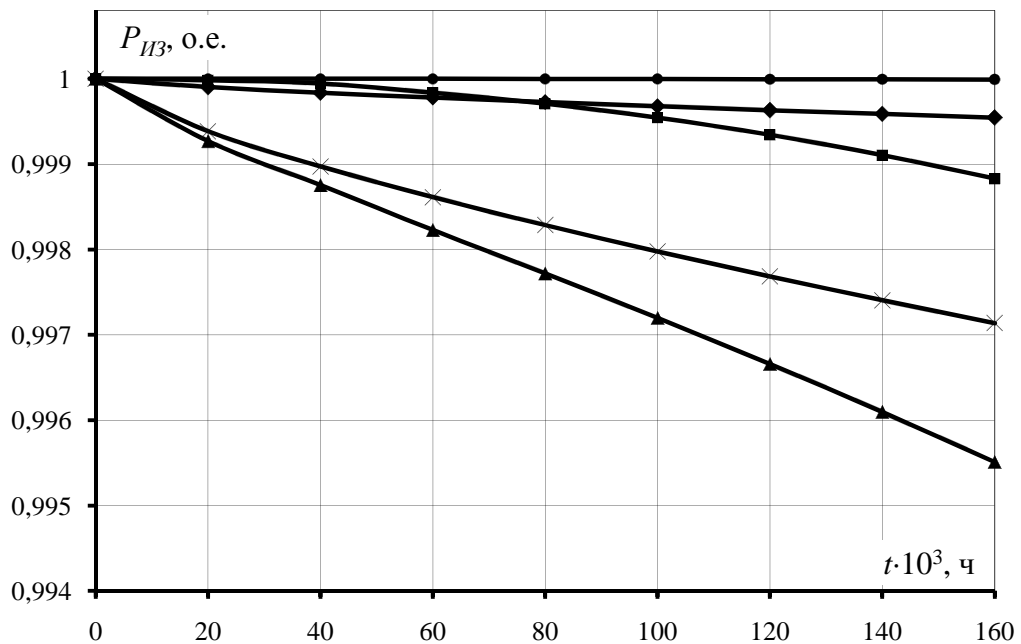


Рис. 3.9. ВБР подшипников 5АН160S6/18НЛБ: ■ – со стороны привода на большой скорости; ● – со стороны привода на малой скорости; × – со стороны

противоположной приводе на большой скорости; ♦ – со стороны противоположной приводе на малой скорости; ▲ – результирующая по износу.

На рис. 3.8-3.9 наглядно представлена высокая надежность по износу подшипников исследуемых АДЛ. Функция ВБР не опускается ниже 0,995 при наиболее нагруженном допустимом режиме работы на протяжении длительного времени эксплуатации, соответственно механический износ не является определяющим в надежности подшипниковых устройств.

Согласно формуле (3.6) используемая смазка вносит свой вклад в надежность подшипниковых устройств. Она предназначена для уменьшения усилий действующих на детали подшипника и увеличения отвода тепла, таким образом, улучшая условия их работы. Однако при возникновении в сепараторе трещин, смазка способствует их увеличению и разрушению подшипника.

Средний ресурс смазки подшипников определяется в соответствии с нормальной моделью надежности, при этом ВБР=0,5 [16]:

$$T_{cp.n} = 10^{(A+B/T_n)} \quad (3.8)$$

где A и B – коэффициенты, зависящие от марки смазки, определенные экспериментальным способом; $T_n=383$ К – температура нагрева смазки подшипников в зоне контакта тел и дорожек качения.

В подшипниках типа 76-180309С9ШЗУ согласно ГОСТ [138] применяется смазка ЛЗ-31 (ТУ 38.1011144-88). Для пополнения смазки подшипников в руководстве по эксплуатации АДЛ [139] рекомендуется консистентная смазка либо ЦИАТИМ-203 (ГОСТ 8773), либо ЛДС-3 (ТУ 0254-033-46977243-2004). Средние ресурсы перечисленных смазок, определены по формуле (3.8), а также сроки их службы в наиболее нагруженном режиме, приведены в табл. 3.5.

Таблица 3.5. Показатели долговечности смазок ЛЗ-31, ЛДС-3 и ЦИАТИМ-203

Наименование смазки	Средний ресурс, ч	Срок службы, ч / лет
ЛЗ-31	45000	60000 / 6,8
ЛДС-3	25000	33333 / 3,8
ЦИАТИМ-203	80000	106666 / 12,2

Сравнивая между собой полученные результаты, делаем вывод о целесообразности применения смазки ЦИАТИМ-203, так как срок ее службы в два раза превышает срок службы смазки ЛЗ-31 и в три раза – ЛДС-3. Однако подшипники, применяемые в современных сериях АДЛ с высотой оси вращения до 180 мм включительно, имеют защитные шайбы, то есть смазка рассчитана на весь срок службы. Поэтому пополнение открытых подшипников смазкой ЦИАТИМ-203 возможно только либо в устаревших сериях, либо в АДЛ с высотой оси вращения выше 200 мм. Кроме того при проведении текущего ремонта в организациях может практиковаться замена смазки во вновь устанавливаемых подшипниках на более долговечную.

Как было определено при расчете подшипников на износ, они имеют высокую надежность даже при окончании срока службы их смазки: ВБР подшипников при 100000 ч непрерывной эксплуатации составляет 0,997. Поэтому одним из основных факторов, влияющих на долговечность подшипниковых устройств, является качество используемой в них смазки.

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 делаем вывод о том, что 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.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод:

1. Подшипниковые устройства являются вторым из узлов (после статора), определяющих надежность асинхронных лифтовых двигателей (8,1 %). Но количество зафиксированных отказов в исследуемой выборке не позволяет провести прогнозирование их технического состояния вероятностно-статистическим методом. Поэтому определение ВБР подшипников при механическом износе и долговечность, применяемой в них смазки проведена 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.

2. В результате проведенных расчетов определены надежность подшипников при износе, средний ресурс и срок службы смазки при наиболее нагруженном режиме работы. Из анализа полученных результатов, сделан вывод о том, что долговечность подшипниковых устройств определяется свойствами и качеством заложенной в них смазки: ВБР подшипников при полной выработке смазкой ЦИАТИМ-203 своего ресурса (80000 ч) составляет 0,997. Кроме того проведен сравнительный анализ долговечности смазок, рекомендуемых для применения в подшипниках АДЛ. Наиболее целесообразно применение смазки ЦИАТИМ-203, так как срок ее службы в два раза превышает срок службы смазки ЛЗ-31 и в три раза – ЛДС-3.

3. 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, для безотказной работы АДЛ при проведении текущего обслуживания и ремонта необходим тщательный контроль технического состояния подшипниковых устройств.

4. Проведенные исследования эксплуатационной надежности основных узлов АДЛ (статора и подшипниковых устройств) с точностью достаточной для разработки рекомендаций ТОиР позволяют считать математическую модель прогнозирования эксплуатационной надежности статоров математической моделью прогнозирования АДЛ в целом.

3.4. Выводы

Прогнозирование эксплуатационной надежности АДЛ нацелено на выявление потенциальных отказов их узлов и деталей и проведение профилактических технических мероприятий до возникновения фактического отказа. Кроме того, при эксплуатации АДЛ не возможно зафиксировать отказы, произошедшие в течение всей эксплуатации, так как двигатели работают на протяжении длительного промежутка времени, измеряемого иногда десятилетиями. Поэтому для обеспечения и повышения надежности АДЛ необходимо, имея эксплуатационную информацию лишь на небольшом промежутке времени, осуществить прогнозирование надежности на протяжении всего функционирования. Существующие методы прогнозирования разделяются на методы аналитического прогнозирования, методы вероятностного прогнозирования и статистическую классификацию, которые базируются на различных принципах. Анализ перечисленных методов показал, что для прогнозирования надежности АДЛ наиболее целесообразно применение вероятностных методов. Проведенные исследования показали следующие результаты:

1. Разработана математическая модель прогнозирования эксплуатационной надежности статоров АДЛ, основанная на математической модели оценки эксплуатационной надежности статоров АДЛ по цензурированным данным, представляющей собой математические формулы и связи между ними. Полученная модель позволяет определить периоды эксплуатации статоров АДЛ (построить "кривую жизни"), определить ВБР на каждом периоде и определить ресурс до капитального ремонта АДЛ.

2. 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 статоров 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 $33 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$.

3. 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.

4. 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. Из анализа полученных результатов, сделан вывод о том, что долговечность подшипниковых устройств определяется свойствами и качеством заложенной в них смазки: ВБР подшипников при полной выработке смазкой ЦИАТИМ-203 своего ресурса (80000 ч) составляет 0,997. Проведен сравнительный анализ долговечности смазок, рекомендуемых для применения в подшипниках АДЛ. Наиболее целесообразно применение смазки ЦИАТИМ-203, так как срок ее службы в два раза превышает срок службы смазки ЛЗ-31 и в три раза – ЛДС-3.

5. 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.

4. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ ОРГАНИЗАЦИИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ ЛИФТОВ

4.1. Обеспечение эксплуатационной надежности асинхронных двигателей для лифтов

Этап эксплуатации лифтовых асинхронных двигателей, является одним из важнейших этапов их жизненного цикла. В начале своего функционирования они имеют высокую надежность, которая на протяжении времени постепенно снижается. В процессе эксплуатации АДЛ подвергаются воздействию различных факторов, которые влияют на техническое состояние их узлов, в том числе на статор и подшипниковые устройства. С течением времени в них происходят необратимые физико-химические процессы, приводящие к отказам АДЛ. Соответственно организация технического обслуживания и ремонта двигателей определяет эффективность их использования. Для повышения надежности АДЛ необходимо установить взаимосвязь между процессом эксплуатации и процессом изменения технического состояния узлов. Проведенные исследования показали достаточно высокую надежность АДЛ, ниже рассмотрены мероприятия, которые способствовали достижению данного уровня.

В нашей стране при ремонте элементов лифтов в жилых домах до 1950 г. действовала стратегия ТОиР реализованная по потребности [140]. Отсутствие в эксплуатационных службах в первую очередь технических средств диагностики, а также информации о сроках службы узлов влекло за собой длительный простой лифтов на ремонте, что привело к разработке комбинированной стратегии ППР [141].

Система ППР применялась при ремонте элементов лифтов в течение нескольких десятков лет и состояла из двух подсистем: капитальных ремонтов и технического обслуживания. Техническое обслуживание предполагает три набора работ, которые отличаются друг от друга объемом, периодичностью проведения и

перечнем обслуживаемых узлов: ТО-1 проводится каждые пятнадцать дней; ТО-2 проводится ежемесячно; ТО-3 проводится каждые шесть месяцев.

В состав работ ТО-2 и ТО-3 входят работы по ТО-1 и ТО-2 соответственно.

Подсистема капитальных ремонтов предусматривает плановые ремонты разной сложности и объема: малый, средний и большой [142, 143].

Благодаря системе ППР длительность периода эксплуатации лифтов значительно превысила расчетные сроки их службы. Несмотря на такое существенное достоинство системы ППР, она имеет неоправданно большой вес капитальных ремонтов, проводимых в соответствии с планом, что является огромным недостатком. Даже после первого года функционирования лифта система предписывает проведение малого капитального ремонта, который экономически целесообразен.

В 1990 г. с учетом накопленного опыта была разработана система ТОиР, имеющая название "Руководство по текущему обслуживанию лифтов". Ее отличием от системы ППР является отсутствие капитального ремонта [140]. Согласно этой системе технические мероприятия, необходимые для поддержания и восстановления эффективного функционирования лифта в части АДЛ приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1. Объем ТОиР

Технические мероприятия, периодичность	Объем работ
Техническое обслуживание, Каждые 2 месяца	1. Измерение сопротивления изоляции обмоток статора относительно друг друга и корпуса. 2. Измерение сопротивления изоляции датчиков температурной защиты. 3. Очистка от загрязнений. 4. Проверка заземления. 5. Визуальный осмотр. 6. Проверка зазора между соединительными муфтами и надежность их крепления. 7. Проверка крепления АДЛ.

Продолжение табл. 4.1

Технические мероприятия, периодичность	Объем работ
Текущий ремонт, Каждые 12 месяцев	1. Работы, предусмотренные ТО. 2. Проверка состояния изоляции. 3. Проверка крепления лобовых частей. 4. Проверка состояния стали. 5. Проверка прочности посадки пазовых клиньев. 6. Проверка подшипниковых устройств. 7. Проверка ротора. 8. Контроль нагрева АДЛ. 9. Испытания на холостом ходу и под нагрузкой.

Работы, выполняемые при ТО (табл. 4.1) проводятся без разборки АДЛ. Параметром, характеризующим техническое состояние обмотки статора лифтовых двигателей, являющимся приемлемым при техническом обслуживании и текущем ремонте является электрическое сопротивление изоляции. Допустимый уровень электрического сопротивления изоляции в холодном состоянии при нормальных климатических условиях указывается в технических условиях на конкретный тип АДЛ. Сопротивление изоляции обмоток двигателя и датчиков температурной защиты считается удовлетворительным, если в холодном состоянии оно не менее 1 МОм, а в горячем состоянии – не менее 0,5 МОм [140, 145]. При необходимости осуществляется сушка изоляции обмоток либо внешним нагревом, либо электрическим током.

При текущем ремонте выполняются работы, предусмотренные ТО, с последующей разборкой АДЛ на месте установки, целью которой является проверка состояния изоляции, крепления лобовых частей, состояния стали и прочности посадки пазовых клиньев.

Недостаточная прессовка выявляется наличием ржавых пятен на поверхности расточки статора, которые появляются при перемещении и трении листов стали. Повреждение межлистовой изоляции обнаруживается по местным перегревам сердечника статора. Ослабление крепления лобовых частей и прочности посадки клиньев в пазу вызывает истирание изоляции, которые устраняются путем локального ремонта. Загрязнение, увлажнение и замасливание

статора приводит к снижению электрической прочности изоляции. Ток холостого хода, имеющий значение выше максимально допустимого, свидетельствует о следующих дефектах: увеличенном воздушном зазоре, недостаточной прессовке сердечника, смещении ротора относительно статора в осевом направлении, ошибках при предыдущем ремонте в части числа витков обмотки статора. Необходимой также является проверка целостности короткозамкнутой обмотки и сердечника ротора. Обнаруженные повреждения необходимо устранить.

Но, не смотря на проводимые профилактические мероприятия, при изучении эксплуатационной надежности выборки АДЛ автором получена картина, представленная в табл. 4.2.

Таблица 4.2. История ремонтов АДЛ

Номер лифта	Вид ремонта	Длительность, ч	Причина	Объем работ
1, 17, 28	Аварийный	54–71	Перегрев АДЛ	Замена ОС
2, 5, 44, 50, 61, 73, 79, 89, 90, 92, 198, 207, 209, 230, 231, 265, 267, 319, 330, 342, 351, 352, 354, 365, 368, 376, 384, 391, 392, 397, 402, 405, 409, 413, 424, 425, 427	Аварийный	1–6	Срабатывание ДТЗ	Перезапуск АДЛ
3, 13, 150, 410	Текущий	2–8	Ослабление крепления лобовых частей ОС	Закрепление ОС
4, 234	Аварийный	34–79	Междувитковое замыкание ОС	Замена ОС
8, 91	Текущий	7–32	Ослабление прессовки сердечника статора	Ремонт сердечника статора
15	Аварийный	87	Пробой пазовой изоляции ОС	Замена ОС
18, 20, 32, 87, 88, 99, 158, 182, 260, 341	Текущий	5–28	Увлажнение ОС	Сушка ОС
41, 42, 47, 98, 102, 186, 190, 261, 421	Аварийный	2–9	Перегрев ОС	Перезапуск АДЛ
58, 292	Аварийный	11–22	Износ подшипника	Замена подшипника
77	Аварийный	59	Междуфазное замыкание ОС	Замена ОС
104, 122, 382	Аварийный	6–8	Междувитковое замыкание ОС	Замена статора
130, 229, 262	Текущий	3–6	Вибрация, ослабление крепления АДЛ	Подтяжка крепящих болтов
157	Текущий	8	Разбит замок крышки	Замена крышки

Продолжение табл. 4.2

Номер лифта	Вид ремонта	Длительность, ч	Причина	Объем работ
160, 256	Текущий	3–6	Нарушение пазовой изоляции	Ремонт изоляции ОС
181, 291	Текущий	21–54	Дисбаланс ротора	Балансировка ротора
204	Аварийный	28	Разрушение подшипника	Замена подшипника
223, 258	Текущий	3–5	Недостаточно смазки в подшипнике	Добавление смазки
264	Аварийный	18	Заклинивание ротора	Замена ротора
272, 369	Текущий	14–18	Дефект выходного конца вала	Ремонт вала
329	Аварийный	23	Наличие постороннего предмета в статоре	Удаление предмета, ремонт изоляции ОС
333	Аварийный	3	Не установлено	–
340, 415	Текущий	12–15	Шум в подшипнике	Замена подшипника

Анализ информации, представленной в табл. 4.2, показывает, что аварийная остановка лифтов является более длительной по сравнению с остановкой, необходимой для проведения текущих ремонтов. Кроме того, на стадии текущего ремонта устраняется значительное количество дефектов, которые в дальнейшем могут привести к аварийному ремонту.

Полученная на этапе прогнозирования эксплуатационной надежности (глава 3) "кривая жизни" статоров АДЛ наглядно показывает, что ТОиР двигателей на каждом из периодов эксплуатации необходимо выполнять с периодичностью, зависящей от уровня интенсивности отказов. Также и капитальный ремонт, являющийся лишним на первых двух периодах, нужно признать экономически оправданным в период износа. Таким образом можно сделать вывод о целесообразности сочетания системы ППР и стратегии ТОиР по текущему состоянию. И, несмотря на то, что в процессе эксплуатации АДЛ происходит необратимый процесс изменения уровня технического состояния их узлов, проведением профилактических мероприятий, заменой стареющих элементов можно добиться того, что на длительный период установится экспоненциальный закон интенсивности отказов. С этой целью разработан

алгоритм технического обслуживания и ремонта АДЛ, приведенный на рис. 4.1 [144].

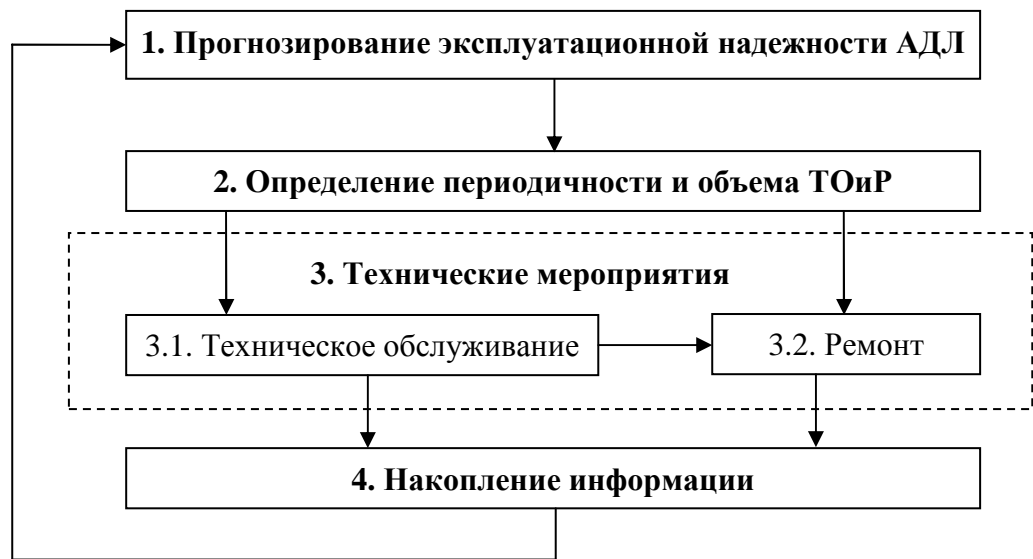


Рис. 4.1. Алгоритм проведения технического обслуживания и ремонта АДЛ

Первый этап представляет собой прогнозирование эксплуатационной надежности АДЛ (глава 3). Полученная при этом математическая модель позволяет определить периоды эксплуатации статоров АДЛ (построить “кривую жизни”), определить ВБР на каждом периоде и определить ресурс до капитального ремонта АДЛ. С точностью достаточной для разработки рекомендаций ТОиР автором принято, что математическая модель прогнозирования эксплуатационной надежности статоров является математической моделью прогнозирования АДЛ в целом.

Второй этап – это определение периодичности и объема ТОиР на основе результатов прогнозирования эксплуатационной надежности АДЛ.

Третий этап включает в себя технические мероприятия по повышению эксплуатационной надежности: техническое обслуживание и ремонт одного из видов. Следует отметить, что проведение проверок, предусмотренных текущим ремонтом и устранение выявленных неполадок восстанавливает надежность АДЛ близкой к первоначальному уровню. 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, работы по восстановлению подшипниковых устройств следует проводить в соответствии со стратегией по текущему состоянию. Текущий ремонт статоров при этом следует проводить в соответствии с системой ППР в зависимости от этапа эксплуатации.

В процессе функционирования АДЛ постепенно появляется информация о времени наработки, отказах, условиях эксплуатации, текущих и капитальных ремонтах, техническом обслуживании, результатах измерения контролируемых параметров. Поэтому завершающим этапом и одновременно возвращающим в начало алгоритма проведения технического обслуживания и ремонта по текущему состоянию является этап накопления информации (4 этап), основываясь на которой можно осуществить повторное прогнозирование эксплуатационной надежности АДЛ и уточнить межремонтный период.

Таким образом:

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

2. Анализ истории ремонтов АДЛ показывает, что аварийная остановка лифтов является более длительной по сравнению с остановкой, необходимой для проведения текущих ремонтов. Кроме того, на стадии текущего ремонта устраняется значительное количество дефектов, которые в дальнейшем могут привести к аварийному ремонту. На основании изложенного следует, что обеспечить высокий уровень безотказности АДЛ можно установлением оптимальной длительности межремонтного периода.

4.2. Определение периодичности текущего ремонта статоров асинхронных двигателей для лифтов

С помощью математической модели прогнозирования (глава 3) впервые в практике эксплуатации получена "кривая жизни" статоров АДЛ 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, построена функция вероятности безотказной работы на всех периодах их эксплуатации и определен средний ресурс до капитального ремонта, который 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. Следовательно, необходима организация текущего ремонта, от периодичности которого зависит эффективность использования АДЛ.

Однако, проведение технических мероприятий приводит к остановке двигателей и простоя лифтов, снижая этим их комплексный показатель надежности [28]:

$$K_{ТИ} = \frac{\sum_{i=1}^n t_{pi}}{\sum_{i=1}^n t_{pi} + \sum_{j=1}^m t_{oj} + \sum_{k=1}^r t_{ремk}}, \quad (4.1)$$

где $K_{ТИ}$ – коэффициент технического использования; t_{pi} – длительность эксплуатации на i -ом интервале; t_{oj} – длительность простоя при j -ом техническом обслуживании; длительность простоя при k -ом ремонте; n – количество интервалов эксплуатации; m – количество технических обслуживаний; r – количество ремонтов.

Таким образом, длительность межремонтного периода должна быть максимальной, но в тоже время обеспечивающей необходимый уровень безотказности двигателей. На рис. 4.2 представлена разработанная автором система ТОиР статоров, имеющая оптимальные сроки восстановительных работ и характеризующая их надежность на всех этапах эксплуатации [144].

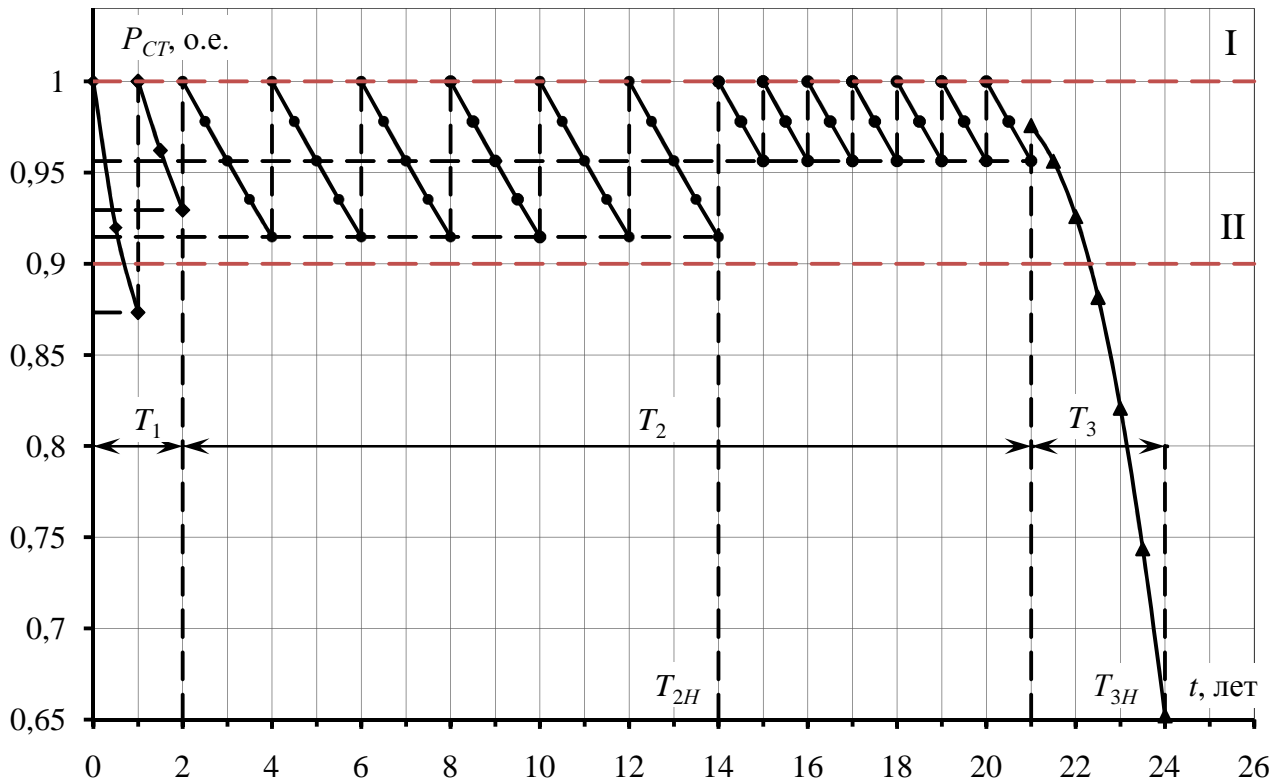


Рис. 4.2. Система текущего ремонта статоров АДЛ:

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

В качестве предельно-допустимого уровня ВБР системы ТОиР принят, оговоренный в технических условиях (табл. 1.3) $P=0,9$ (уровень II на рис. 4.2) [49]. То есть, при снижении ВБР до этого уровня, необходимо проведение текущего ремонта.

На этапах моделирования (§ 2.7) и прогнозирования (§ 3.2) эксплуатационной надежности статоров АДЛ определены периоды их эксплуатации (приработки, нормальной работы и износа), длительность и модели надежности, в соответствии с которыми происходит появление отказов на каждом этапе.

Явно выраженный период приработки T_1 статоров АДЛ длится два года. Это связано со скрытыми дефектами, допущенными на стадиях разработки и изготовления, а также с особым режимом нагружения, который характеризуется

большим количеством циклов работы и массой перевозимого груза при заселении новостройки. Зависимость (—♦—) представляет собой ВБР уменьшающаяся по закону Вейбула:

$$P_{CT}(t) = \exp[-\alpha \cdot t^\beta] \quad (4.2)$$

где $P_{CT}(t)$ – функция вероятность безотказной работы; $\alpha=0,00024$ – параметр определяющий масштаб; $\beta=0,697$ – параметр асимметрии.

Благодаря срабатыванию датчиков температурной защиты отказы первого периода в дальнейшем не влияют на надежность статоров АДЛ. Вызывая простой лифтов, датчики сохраняют обмотку в исправном состоянии. Первый текущий ремонт целесообразно проводить после года эксплуатации при $P_{CT}=0,87$, так как при определении эксплуатационной надежности срабатывание ДТЗ было принято за отказ. Приработочные отказы в дальнейшем не влияют на надежность АДЛ, и ВБР после проведения ремонта вновь повышается до первоначального уровня $P_{CT}=1$ (уровень I на рис. 4.2). Следующий текущий ремонт необходимо организовать по окончании периода приработки через два года эксплуатации, ВБР при этом не достигает предельно-допустимого уровня. Согласно формуле (4.1) восстановление надежности АДЛ происходит не мгновенно, а на протяжении интервала равного длительности ремонтных работ. На рис. 4.2 этот период не показан.

Нормальный период характеризуется экспоненциальной моделью надежности (зависимость —●—), имеющей только внезапные отказы:

$$P_{CT}(t) = \exp[-\lambda_{CT} \cdot t], \quad (4.3)$$

где $\lambda_{CT}=0,00000509 \text{ ч}^{-1}$ – интенсивность отказов.

До предельно-допустимого уровня ВБР в период нормальной эксплуатации снижается через 21900 ч наработки. Так как функция надежности носит вероятностный характер, необходимо проведение ремонтных мероприятий раньше достижения уровня II. Оставив 20 % запас по времени, установлена периодичность ТР равная двум годам. На текущем этапе эксплуатации еще не

происходит необратимых изменений технического состояния элементов статора, следовательно, восстановление ВБР происходит до первоначального уровня.

Определению межремонтного периода статоров АДЛ предшествовала статистическая обработка массива исходных данных, полученного в процессе эксплуатации. Указанный массив является цензурированным, то есть период наблюдения за группами сформированных выборок имеет интервалы неопределенности слева и справа. До этого момента использовались только точечные значения исследуемых параметров. Для наиболее точного определения межремонтного периода необходимо введение понятия доверительной вероятности. С помощью разработанной автором программы "Оценка эксплуатационной надежности технических устройств по цензурированным данным" по формулам (2.34) и (2.35) определены границы доверительного интервала, внутри которого находится истинное значение исследуемой величины, в нашем случае T_{cp} – средняя наработка до отказа. Результаты расчетов представлены в табл. 4.3.

Таблица 4.3. Границы доверительных интервалов

Период эксплуатации	T_H , ч	T_{cp} , ч	T_B , ч
Нормальная работа	125430	273213	421033
Износ	211389	216731	222074

Доверительная вероятность границ доверительных интервалов, приведенных в табл. 4.3 составляет $\theta=0,9$.

Как было определено в результате исследований, проведенных в главе 3, средняя наработка до отказа в нормальный период эксплуатации представляет собой среднюю наработку до первого отказа T_{cp} , а в период износа – средний технический ресурс двигателей и обозначается T_p . Полученная средняя наработка до первого отказа статоров АДЛ больше их технического ресурса, это значит, что T_{cp} только показывает, насколько надежны АДЛ в период нормального

функционирования. Глубина цензурирования в зависимости от группы выборки находится в пределах 0,7–0,9:

$$h = \frac{\tau}{\tau + a}, \quad (4.4)$$

где h – глубина цензурирования, τ – количество цензурированных наработок, a – количество наработок до отказа.

Глубина цензурирования определяет широкие границы доверительного интервала в нормальный период эксплуатации. В соответствии с позицией обеспечения наибольшей вероятности невыхода из строя исследуемого объекта, нижняя граница доверительного интервала имеет большое значение. Высокую безотказность работы можно получить только на интервале меньшем, чем T_{cp} . Поэтому от момента времени T_H , являющегося нижней границей доверительного интервала наработки до первого отказа, следует уменьшить длительность межремонтного периода до одного года. Функция ВБР на этапе эксплуатации от 14 до 21 года не опускается ниже уровня 0,96. Такая мера обеспечения надежности является оправданной в виду ограниченного периода наблюдения за АДЛ. При накоплении эксплуатационной информации и сужении границ доверительного интервала возможна корректировка системы ТОиР.

После 21 года эксплуатации в изоляционной системе статорных обмоток начинают протекать необратимые процессы старения, что наглядно показывает ВБР (период T_3) двигателей (зависимость –▲–), подчиняющаяся нормальному закону распределения:

$$P_{CT}(t) = 1 - \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_0^t \exp \left[\left(-\frac{(t - \mu^2)}{2 \cdot \sigma^2} \right) \right] dt, \quad (4.5)$$

где $\sigma=16596$ ч – среднеквадратическое отклонение; $\mu=32771$ ч – математическое ожидание.

Восстановление технического состояния статора после 184000 часов наработки до уровня $P_{CT}=1$ становится невозможным. При достижении наработкой значения среднего технического ресурса необходимо проведение капитального ремонта, то есть полная замена либо обмоток, либо статора в целом.

Принимая во внимание значение нижней границы доверительного интервала, вышеуказанные технические мероприятия следует проводить после 24-летнего срока службы. На этапе износа эксплуатация АДЛ связана с приемлемой степенью риска, в связи с этим необходим более тщательный контроль технического состояния двигателя каждые 6 месяцев. Периодичность текущих ремонтов статоров АДЛ, определенная в настоящем параграфе представлена в табл. 4.4.

Таблица 4.4. 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

Техническая документация предписывает проведение текущего ремонта АДЛ не реже одного раза в год согласно системе ППР вне зависимости от периода эксплуатации и их технического состояния. Сравнивая это значение межремонтного периода с полученными расчетными значениями (табл. 4.4), выявлено, что оно полностью справедливо только в период приработки. В период нормальной работы АДЛ поступают в ремонт, не израсходовав своего ресурса, приводя к вынужденному простоя лифтов и увеличению денежных затрат. Обратная ситуация наблюдается в период износа, когда эксплуатация двигателей связана с допустимой степенью риска, длительность межремонтного периода тем не менее завышена.

Функции ВБР (рис. 4.2) статоров АДЛ были получены в результате группового прогнозирования, для каждого конкретного двигателя они будут отличаться от представленных, поэтому срок капитального ремонта, указанный в табл. 4.4, является ориентировочным. Текущий ремонт, проводимый на этапе

износа каждые 6 месяцев, позволяет установить точную дату вывода из эксплуатации АДЛ и по возможности, продлить их срок службы.

Резюмируя, следует отметить:

1. 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.

2. 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.

Представленная организация текущего ремонта статоров АДЛ основана на групповом прогнозировании их эксплуатационной надежности. Поэтому срок капитального ремонта для каждого конкретного двигателя должен уточняться при текущем ремонте на этапе износа.

4.3. Рекомендации по совершенствованию системы организации технического обслуживания и ремонта асинхронных двигателей для лифтов

Эффективность эксплуатации АДЛ существенно возрастет, если между установленными в предыдущем параграфе текущими ремонтами проводить плановое техническое обслуживание с использованием средств диагностики. Их применение позволяет обнаружить дефекты на ранней стадии развития и дает возможность предупреждения отказов, а значит и увеличения долговечности АДЛ.

На современном этапе развития техники разработано множество диагностических систем, позволяющих оперативно проводить диагностику двигателей: измерять сопротивление изоляции, проводить испытания напряжением постоянного тока и импульсным напряжением, что дает возможность в дальнейшем более точно прогнозировать старение изоляции, обнаруживать повреждения в беличьей клетке роторов, места межвиткового короткого замыкания, дефекты корпусной изоляции, расслоение изоляции и плохую пропитку, дефекты обоям, тел качения, сепаратора, ослабление посадки и т.д. [146-150]. Недостатком диагностических систем является их высокая стоимость, поэтому их применение целесообразно только для турбогенераторов, компенсаторов и других электрических машин большой мощности. С целью определения параметра, контроль которого позволит своевременно и оперативно выявлять повреждения, рассмотрим АДЛ как составную часть пассажирского лифта, представляющего собой единую систему (рис. 2.3).

К пассажирским лифтам предъявляются повышенные требования к вибрации и шуму, так как вибрация, передающаяся на людей через кабину, оказывает отрицательное воздействие на здоровье. К тому же, тело человека обладает собственными частотами [151]. Для уменьшения вибраций составные элементы лифта устанавливаются на амортизаторы и также как, и лифт имеют повышенные требования к вибрации и шуму. Тем не менее, конструкция лифта содержит инерционные массы и упругости и представляет собой колебательную

систему "двигатель – подвес". Такая система, в свою очередь, состоит из двух подсистем: "масса кабины – упругость троса" и "двигатель – нагрузка", которые взаимосвязаны между собой и раскачивают друг друга. Поэтому уровень вибрации АДЛ необходимо контролировать на протяжении всей эксплуатации. Техническое состояние двигателя напрямую не всегда можно связать с вибрацией, но ее повышенный уровень однозначно связан с какими-либо неполадками, внешними или внутренними. Подвергаясь воздействию колебаний со стороны подвеса ослабляется крепление АДЛ, увеличивая этим вибрацию. Также повышенная вибрация двигателя может возникать по причине несоосности валов двигателя и механизма, дисбаланса ротора, дефектов подшипников, некачественной сборки, короткого замыкания в обмотках статора, обрыва стержней в короткозамкнутой обмотки ротора. Наличие вибрации независимо от ее источника приводит к ухудшению свойств изоляции обмоток статора, вызывая в ней микротрещины. Возникшие микротрещины накапливают в себе влагу, снижая сопротивление изоляции и приводя в дальнейшем к межвитковым и межфазным коротким замыканиям. Кроме того происходит ослабление крепления лобовых частей обмоток, вызывая этим трение между пазовой изоляцией и сердечником статора и, как следствие, разрушение и пробой изоляции на выходе из паза.

Согласно технической документации [48, 49] замена подшипников АДЛ проводится через 12000 часов непрерывной наработки. При этом измерить точно наработку не представляется возможным из-за отсутствия в двигателях, предусмотренных для этого счетчиков и непрерывного контроля со стороны обслуживающего персонала. Лифты являются специфическим средством передвижения, в которых движением управляет сам пассажир. При прогнозировании надежности и долговечности подшипниковых устройств АДЛ (§ 3.3) было определено, что подшипники при износе имеют высокую надежность. Долговечность же определяется качеством, используемой в них смазки и эксплуатационными факторами, которые не были учтены при расчете по стандартной методике. На основании выше изложенного следует, что замену

подшипниковых устройств необходимо проводить в зависимости от их технического состояния, определенного на этапе технического обслуживания путем измерения их вибрации.

На основе приведенных фактов следует сделать вывод о целесообразности применения методов вибродиагностики, которые в настоящее время нашли наибольшее распространение при оценке технического состояния электрических машин. Для контроля уровня вибрации могут применяться различные аппаратные средства, которые в достаточном количестве присутствуют на российском рынке.

Выбор того или иного метода вибродиагностики в каждом конкретном случае должен обосновываться следующими факторами: необходимой точностью диагностики, режимами работы двигателей, требованиями к аппаратуре, условиями, в которых проводятся диагностика.

Методы вибродиагностики асинхронных двигателей можно разделить на группы, наиболее распространенными из них являются [152]:

- определение среднеквадратичного значения (СКЗ) вибросигнала т.е. энергии вибрации;
- определение траекторий колебаний;
- спектральный анализ огибающей;
- спектральный анализ;
- кепстральный анализ;
- специальные диагностические параметры;
- ультразвуковая дефектоскопия;
- вейвлет-анализ;
- статистическая обработка сигналов вибрации;
- диагностика на основе нейронных сетей.

Проведя анализ перечисленных методов для оценки вибрационного состояния АДЛ, автором сделан выбор в пользу измерения СКЗ виброскорости. Основным достоинством этого метода является низкая стоимость и простота реализации с помощью обычного виброметра общего уровня. Недостаток метода состоит в невозможности точного определения природы дефекта и слабой

помехозащищенности. Среднеквадратичные значения вибрационной скорости исследуемых АДЛ с высотой оси вращения 160, 180 мм не должна превышать 1,8 мм/с [48, 49].

Первоначально измерение вибрации двигателей следует провести после монтажа на месте эксплуатации. Контроль проводится на скорости, для которой вибрации максимальны. Последующие измерения проводить с периодичностью в два месяца во время технического обслуживания. Если текущий уровень вибрации в какой-либо из контрольных точек превышает предельно-допустимый уровень, необходимо провести внеплановый ремонт АДЛ в объеме текущего ремонта. А если уровень вибрации близок к предельно-допустимому, то следует планировать ремонт в срок ближайшего технического обслуживания. В течение текущего ремонта измерение уровней вибрации должно проводиться дважды: до и после разборки двигателя. Данная мера необходима для оценки качества проведенного ремонта. При исследовании подшипниковых устройств (§ 3.3) было выявлено, что их надежность под воздействием механического износа на протяжении длительного времени эксплуатации снижается незначительно. Такое утверждение справедливо в случае качественной установки подшипников. При некачественной сборке, то есть при наличии перекоса подшипниковых крышек и щитов, при несоблюдении технологии монтажа подшипниковых устройств, а также при повышенной вибрации по любой из причин, происходит преждевременный износ и разрушение подшипников. Поэтому проведение текущего ремонта неквалифицированным персоналом может привести к снижению надежности АДЛ.

Анализ отказов асинхронных двигателей (§ 1.2) показал, что большинство из них приводят к чрезмерному нагреву. Поэтому для надежной работы АДЛ необходим периодический контроль их температуры, который должен осуществляться не только при текущем ремонте (табл. 4.1), но и при техническом обслуживании. Если температура превышает предельно-допустимую следует провести текущий ремонт двигателя.

В заключении отметим:

1. 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.

2. Для продления срока службы двигателей следует 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.

4.3. Выводы

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

2. Анализ истории ремонтов АДЛ показывает, что аварийная остановка лифтов является более длительной по сравнению с остановкой, необходимой для проведения текущих ремонтов. Кроме того, на стадии текущего ремонта устраняется значительное количество дефектов, которые в дальнейшем могут привести к аварийному ремонту. На основании изложенного следует, что обеспечить высокий уровень безотказности АДЛ можно установлением оптимальной длительности межремонтного периода.

3. 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.

4. 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, (2–21) 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.

Представленная организация текущего ремонта статоров АДЛ основана на групповом прогнозировании их эксплуатационной надежности. Поэтому срок капитального ремонта для каждого конкретного двигателя должен уточняться при текущем ремонте на этапе износа.

5. 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.

6. Для продления срока службы двигателей следует 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.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение эксплуатационной надежности лифтовых асинхронных двигателей является актуальной задачей электромеханики. Массовый ввод лифтов в эксплуатацию пришелся на 80-е годы прошлого века, соответственно количество лифтов выработавших срок службы, составляет порядка 35 % и продолжает расти. Материалы, представленные в диссертации, позволяют решить научно-практические задачи, заключающиеся в определении показателей надежности АДЛ на основе информации, поступившей в процессе их функционирования, выявлении недостатков эксплуатации, корректировке периодичности и трудоемкости технического обслуживания и ремонта, уменьшении длительности простоя пассажирских лифтов и снижении финансовых затрат. Проведенные в диссертационной работе исследования эксплуатационной информации направленные на повышение эксплуатационной надежности АДЛ показали следующие научные и практические результаты:

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 простою 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 соответствии 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 ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ

- АД – асинхронный двигатель
АДЛ – асинхронный двигатель лифтовый
ВБР – вероятность безотказной работы
ДТЗ – датчик температурной защиты
КМЗ – Карачаровский механический завод
КР – капитальный ремонт
МЛЗ – Могилевский лифтостроительный завод
ММ – математическая модель
ОЛЗ – Омский лифтостроительный завод
ОС – обмотка статора
ППР – планово-предупредительный ремонт
СКЗ – среднеквадратичное значение
СЛЗ – Самаркандский лифтостроительный завод
ТД – техническое диагностирование
ТО – техническое обслуживание
ТОиР – техническое обслуживание и ремонт
ТР – текущий ремонт
ТС – текущее состояние
ТУ – технические условия
ЦВ – цензурированные выборки
ЩЛЗ – Щербинский лифтостроительный завод
ЭМ – электрическая машина
ЭН – эксплуатационная надежность

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов Н.Л. Надежность электрических машин : учеб. пособие для вузов / Н.Л. Кузнецов. – М. : Издательский дом МЭИ, 2006. – 432 с.
2. Стрельбицкий Э.К. Исследование надежности и качества электрических машин : автореф. дис. ... докт. техн. наук. – Томск, 1967. – 44 с.
3. Гольдберг О.Д. Качество и надежность асинхронных двигателей. – М. : Энергия, 1968. – 202 с.
4. Похолков Ю.П. Разработка методов исследования, расчета и обеспечения показателей надежности и долговечности изоляции обмоток асинхронных двигателей : автореф. дис. ... докт. техн. наук. – Москва, 1978. – 39 с.
5. Муравлёв О.П. Теория точности электрических машин и ее развитие в Томском политехническом университете // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308, № 4 – С. 236-242.
6. Обеспечение надежности асинхронных двигателей / П.И. Захарченко, И.Г. Ширнин, Б.Н. Ванеев, В.М. Гостищев. – Донецк : УкрНИИВЭ, 1998. – 324 с.
7. Сорокер Т.Г., Воскресенский А.П., Даниленко С.Е. и др. Оптимальное проектирование серий асинхронных двигателей на ЦВМ. Сб. трудов ВНИИЭМ. – М. : 1976. – Т. 47. – С. 22-30.
8. Оптимальное проектирование асинхронных взрывозащищенных двигателей / В.Ф. Горягин, В.И. Загрядский, Т.А. Сычева и др. – Кишинев : Штиинца, 1980. – 200 с.
9. Галушко А.И., Оснач Р.Г. Контроль состояния межвитковой изоляции обмоток электрических машин и аппаратов // Электроизоляционные материалы. – М. : МДНТП, 1973. С. 97-99.
10. Яманов С.А., Яманова Л.В. Старение, стойкость и надежность электрической изоляции. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 176 с.
11. Гольдберг О.Д. Инженерное проектирование и САПР. – М. : Академия, 2008. – 560 с.

12. О новом подходе к проектированию электрических машин / З.С. Темлякова, М.Г. Персова, Ю.Г. Соловейчик, Р.В. Петров, В.В. Гречкин // Электротехника. – 2007. – № 9 – С. 15-21.
13. Ланберсон Л. Надежность и проектирование систем. – М. : Наука, 1982.
14. Антонов М.В. Технология производства электрических машин. – М. : Энергоатомиздат, 1993. – 592 с.
15. Животкевич И.Н., Смирнов А.П. Надежность технических изделий. – М. : Институт испытаний и сертификации вооружений и военной техники, 2004. – 472 с.
16. ОСТ 16.0.800.821-88. Машины электрические асинхронные мощностью свыше 1 кВт до 400 кВт включительно. Двигатели. Надежность. Расчетно-экспериментальные методы определения. М. : Информэлектро, 1988. – 210 с.
17. Перель Л.Я. Подшипники качения: Расчет, проектирование и обслуживание опор. Справочник. – М. : Машиностроение, 1983. – 490 с.
18. Шор Я.Б. Статистические методы анализа и контроля качества и надежности. – М. : Советское радио, 1962. – 552 с.
19. Шэннон Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука. – М. : Мир, 1978. – 418 с.
20. Анализ надежности технических систем по цензурированным выборкам / В.М. Скрипник, А.Е. Назин, Ю.Г. Приходько, Ю.Н. Благовещенский. – М. : Радио и связь, 1988. – 184 с.
21. Петросов А.А. Стратегическое планирование и прогнозирование : учеб. пособие. – М. : Издательство Московского государственного горного университета, 2001. – 464 с.
22. Дуброва Т.А. Статистические методы прогнозирования. – М. : ЮНИТИ-ДАНА, 2003. – 205 с.
23. Шпет Н.А. Оценка эксплуатационной надежности технических устройств // Электронные и электромеханические системы и устройства : Тезисы докладов XIX науч.-техн. конф. 16-17 апреля 2015 г. – Томск : АО "НПЦ "Полюс", 2015. С. 114-116.

24. Гаскаров Д.В., Голнкевич Т.А., Мозгалеvский А.В. Прогнозирование технического состояния и надежности радиоэлектронной аппаратуры. – М. : Сов. радио, 1974. – 224 с.
25. Острейковский В.А. Теория надежности : учеб. для вузов. – 2-е изд. перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 2008. – 463 с.
26. Гусев В.В. Показатели безотказности электрических машин при эксплуатации алмазодобывающего комплекса // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 316, № 4. – С. 178-183.
27. Муравлёв О.П., Гусев В.В., Шевчук В.П. Стадия эксплуатации электрических машин в алмазодобывающем комплексе как объективный процесс оценки показателей надежности машин // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2010. – № 3-4/1. – С. 27-37.
28. Полоvко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности. – 2-е изд. – СПб. : БХВ-Петербург, 2006. – 704 с.
29. Хан Г., Шапиро С. Статистические модели в инженерных задачах. – М. : Мир, 1969. – 396 с.
30. ГОСТ 27.002–2009 Надежность в технике. Термины и определения. – Введ. 2011-01-01. – М. : Федеральное агентство по техническому регулированию и технологии : Стандартинформ, 2010. – 28 с.
31. Серый Е.В. Рейтинг дефектов низковольтных электродвигателей // Рынок электротехники. – 2007. – № 2. – С. 35.
32. Боровков А.А. Теория вероятностей. – М. : Наука, 1976. – 431 с.
33. Ермолин Н.П., Жерехин И.П. Надежность электрических машин. – Л. : Энергия, 1976. – 248 с.
34. Муравлёв О.П., Шевчук В.П., Гусев В.В. Информационное обеспечение для оценки эксплуатационной надежности электрических машин // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2008. – № 7-8/1. – С. 183-191.
35. Муравлёв О.П., Ведяшкин М.В. Эксплуатационная надежность асинхронных двигателей мостовых кранов // Известия вузов. Электромеханика. – 2011. – № 6. – С. 34-38.

36. Лифты : учеб. для вузов / под общ. ред. Д.П. Волкова. – М. : изд-во АСВ, 1999. – 480 с.

37. Волков Д.П., Чутчиков П.И. Надежность лифтов и технология их ремонта. М. : Строй-издат, 1985. – 130 с.

38. Владимирский электромоторный завод: Технический каталог [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.vemp.ru/pdf/Katalog_VEMZ_2008.pdf (дата обращения 20.03.2014).

39. Афонин В.И., Балабанов И.Н. Регулируемый электропривод лифтов с асинхронными электродвигателями // Электротехника. – 2006. – № 5. – С. 37-42.

40. Антропов А.Т., Ланграф С., Рикконен С.В., Гимпельс А. Современная лифтовая система с безредукторной лебедкой. // itech – журнал интеллектуальных технологий. – 2009. – № 14.

41. Афонин В.И. Предварительный выбор двигателей для привода редукторных лебедок лифтов // Электротехника. – 2008. – № 11. – С. 53-57.

42. Шпет Н.А. Основные требования, предъявляемые к асинхронным двигателям для лифтов // XVII Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Современные техника и технологии" / Сборник трудов в 3-х томах. Т. 1. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – С. 567-568.

43. ГОСТ 15150–69 Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды. – Введ. 1971-01-01. – М. : Государственный комитет СССР по стандартам : Стандартиформ, 2010. – 58 с.

44. ГОСТ ИЕС 60034-5–2011 Машины электрические вращающиеся. Часть 5. Классификация степеней защиты, обеспечиваемых оболочками вращающихся электрических машин (Код IP). – Введ. 2013-01-01. – М. : Федеральное агентство по техническому регулированию и технологии : Стандартиформ, 2013. – 16 с.

45. ГОСТ 20459–87 Машины электрические вращающиеся. Методы охлаждения. Обозначения. – Введ. 1989-01-01. – М. : Государственный комитет СССР по стандартам : Изд-во стандартов, 1988. – 15 с.

46. ГОСТ 8865–93 Система электрической изоляции. Оценка нагревостойкости и классификация. – Введ. 1995-01-01. – Минск : Межгосударственный совет по организации, метрологии и сертификации : Изд-во стандартов, 2003. – 6 с.

47. ГОСТ 2479–79 Машины электрические вращающиеся. Условные обозначения конструктивных исполнений по способу монтажа. – Введ. 1981-01-01. – М. : Государственный комитет СССР по стандартам : Изд-во стандартов, 1990. – 24 с.

48. ТУ16-18 ВИГЕ.526213.004ТУ Двигатели асинхронные 5АН180S...НЛБ, 5АН180S...НЛБ. Технические условия. – Владимир : ОАО "Владимирский электромоторный завод", 1998. – 47 с.

49. ТУ16-510.778-81 Двигатели асинхронные 4АМН160НЛБ, 4АМН180НЛБ, А200НЛБ(Ф). Технические условия. – Ярославль : ОАО "Ярославский электромашиностроительный завод", 2004. – 37 с.

50. ГОСТ 27.003–90 Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности. – Введ. 1992-01-01. – М. : Государственный комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам: Стандартинформ, 2007. – 19 с.

51. ГОСТ 27.310–95 Надежность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения. – Введ. 1997-01-01. – Минск : Межгосударственный совет по организации, метрологии и сертификации: Изд-во стандартов, 2002. – 12 с.

52. Дианов В.Н. Диагностика и надежность автоматических систем: учебное пособие.- М. : изд-во МГИУ, 2005. – 160 с.

53. 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. 17-18 мая 2012 г. – Томск: ТПУ, 2012. – С. 84-86.

54. Гольдберг О.Д. Испытания электрических машин : учебник для втузов. – 2-е изд. – М. : Высшая школа, 2000. – 255 с.

55. Пешес Л.Я., Степанова М.Д. Основы теории ускоренных испытаний на надежность. – Минск. : Наука и Техника, 1972. – 165 с.
56. Жерве Г.К. Промышленные испытания электрических машин. – 4-е изд. – Л. : Энергоатомиздат, 1984. – 408 с.
57. Костелец Н.Ф., Кузнецов Н.Л. Испытания и надежность электрических машин : учеб. пособие. – М. : Вышс. шк., 1988. – 232 с.
58. Барлоу Р.Э., Прошан Ф. Математическая модель надежности. – М. : Советское радио, 1969. – 488 с.
59. Барлоу Р.Э., Прошан Ф. Статистическая теория надежности и испытания на безопасность. – М. : Наука, 1984. – 326 с.
60. Герцбах И.Б. Модели профилактики. – М. : Советское радио, 1969. – 214 с.
61. Герцбах И.Б., Кордонский Х.Б. Модели отказов. – М. : Советское радио, 1966. – 168 с.
62. Фукс Г.И., Кутейникова З.А. Поверхностные явления и надежность узлов трения механизмов приборов. // Надежность и долговечность. – М. : Машиностроение, 1984. – 180 с.
63. Нечипоренко В.И. Структурный анализ систем. – М. : Советское радио, 1977. – 216 с.
64. Бердичевский Б.Е. Вопросы обеспечения надежности РЭА при разработке. – М. : Советское радио, 1997.
65. Kaplan E.L., Meier P. Nonparametric Estimation from Incomplete Opseervations // J. Amer. Statist. Assoc. – 1958. – V. 53. – P. 457-481.
66. Nelson W. Hasard plotting for incomplete failure data // J. Qual. Tech. – 1969. – V. 1. – P. 27–52.
67. Gill R. D. Censored and stochastic integrals // Matematical centre tracts. 124. – Amsterdam : Mathematisch Centrum, 1980. – 172 p.
68. Статистический анализ цензурированных выборок: (Современное состояние и перспективы развития теоретических основ и прикладных методов

анализа по цензурированным выборкам) / В.М. Скрипник, А.Е. Назин, Ю.Г. Приходько, В.В. Пискун. – Минск : МВИЗРУ, 1987. – 174 с.

69. Беляев Ю.К. Непараметрические методы в задачах обработки результатов испытаний и эксплуатации. – М. : Знание, 1984. – 60 с.

70. Беляев Ю.К. Статистические методы обработки результатов испытаний на надежность. – М. : Знание, 1982. – 66 с.

71. Padgett W.J., McNichols D.T. Nonparametric density estimation from censored data // Comm. Statist. Theory Methods. – 1984. – V. 13, № 13 – P. 1581-1611.

72. Кендалл М.Ж., Стьюарт А. Статистические выводы и связь : Пер. с англ. – М. : Наука, 1973. – 900 с.

73. Мостеллер Ф., Тьюки Дж. Анализ данных и регрессия. – М. : Финансы и статистика, 1982. – 319 с.

74. Efron B. Censored data and bootstrap // J. Amer. Statist. Assoc. – 1981. – V. 76, № 374 – P. 312-319.

75. Адлер Ю.П., Гадолина И.В. Влияние числа бутстреп выборок на точность статистического оценивания в задачах контроля эксплуатационной надежности. – Планирование эксперимента : Материалы семинара / МДНТП. – М. : 1985. – С. 109-114.

76. Гниденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности. – М. : Наука, 1965. – 524 с.

77. Крамер Г. Математические методы статистики : Пер. с англ. – М. : Мир, 1975. – 648 с.

78. ГОСТ 27.503-81 Методы оценки показателей надежности. – Введ. 1982-07-01. – М. : Государственный комитет СССР по стандартам : Изд-во стандартов, 1982. – 56 с.

79. ГОСТ 27.504-81 Методы оценки показателей надежности по цензурированным выборкам. – Введ. 1985-07-01. – М. : Государственный комитет СССР по стандартам : Изд-во стандартов, 1984. – 41 с.

80. Надежность технических систем: Справочник / Ю.К. Беляев, В.А. Богатырев, В.В. Болотин и др. Под ред. И.А. Ушакова. – М. : Радио и связь, 1985. – 608 с.

81. Фишбейн Ф.И. Графические методы в планировании и обработке результатов испытаний на надежность // В помощь слушателям семинара по надежности и прогрессивным методам качества продукции. – М. : Знание, 1979. – С. 3-55.

82. Скрипник В.Н., Назин А.Е. Оценка надежности технических систем по цензурированным выборкам / Под ред. А.И. Широкова. – Минск : Наука и техника, 1981. – 144 с.

83. Назин А.Е., Приходько Ю.Г., Скрипник В.Н., Явид Ю.Ю. Вопросы обработки статистической информации по цензурированным выборкам. (Информационный обзор по материалам зарубежных публикаций). – Минск : МВИЗРУ, 1979. – 86 с.

84. Управление ремонтом и модернизацией оборудования (экономический аспект) / Н.И. Иванов, В.И. Хижняк, Л.Т. Хижняк и др. – Киев : Наук. думка, 1989. – 184 с.

85. Емелин Н.М. Отработка систем технического обслуживания летательных аппаратов. – М. : Машиностроение, 1995. – 128 с.

86. ГОСТ 18322-78 Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения. – Введ. 1980-01-01. – М. : Госсударственный комитет СССР по стандартам : Стандартиформ, 2007. – 11 с.

87. Назарычев А.Н., Андреев Д.А. Методы и математические модели комплексной оценки технического состояния электрооборудования. – Иваново : Иван. гос. энерг. ун-т, 2005. – 224 с.

88. Назарычев А.Н. Методы и модели оптимизации ремонта электрооборудования объектов энергетики с учетом технического состояния. – Иваново : Иван. гос. энерг. ун-т, 2002. – 168 с.

89. Костелец Н.Ф. Испытания, эксплуатация и ремонт электрических машин : учеб. – М. : Академия, 2003. – 342 с.

90. Ящура А. И. Система технического обслуживания и ремонта общепромышленного оборудования: Справочник [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.litmir.me/br/?b=117241&p=14> (дата обращения 12.01.2015).

91. Ерохин Е.А., Осинцев А.Е. Эволюция систем технического обслуживания и ремонта оборудования [Электронный ресурс] // Информационный сайт по экономике. – Режим доступа: <http://www.ekportal.ru> (дата обращения 10.01.2015).

92. Организация ремонтов: качество через ТРМ, или о предельной эффективности оборудования [Электронный ресурс] // Информационно-образовательный портал по Управлению ТОиР. – Режим доступа: <http://www.prostoev.net> (дата обращения 10.01.2015).

93. Зюзин А. Ф., Вишток А. М., Поконов Н. З. Монтаж, эксплуатация и ремонт электрооборудования предприятий и установок. – М. : Высш. шк., 1971. – 366 с.

94. Синягин Н. Н. Экономические аспекты планирования и организации ремонта оборудования в промышленности США // Промышленная энергетика. 1972, – № 7. – С. 52-55.

95. Управление техобслуживанием и ремонтами [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.ifsruussia.ru/eam.htm> (дата обращения 21.12.2013).

96. Туровец О. Г. Теория организации : учеб. пособие / О.Г. Туровец, В.Н. Родионова. – Воронеж : Изд-во ВГТУ, 2003. –145 с.

97. Кеннеди Р., Маца Л. Взаимодействие 5S и ТРМ в системе ТРМЗ // Стандарты и качество. – 2004. – № 8. – С. 23-31.

98. Селиванов А.И. Основы теории старения машин. – М. : Машиностроение, 1970. – 408 с.

99. Климов А.Н., Попова Л.Г. Организация ремонта производственного оборудования машиностроительных предприятий. – СПб : Машиностроение, 1988. –144 с.

100. Братухин А.Г., Давыдов Ю.В., Елисеев Ю.С. и др. CALS в авиастроении. – М. : Издательство МАИ, 2000. – 307 с.

101. Колегаев Р. Экономическая оценка качества и оптимизации системы ремонта машин. – М. : Машиностроение, 1980. – 239 с.
102. Как работают японские практики / Под ред. Мондена Я. – М. : Экономика, 1989. – 261 с.
103. Шонбергер Р. Японские методы управления производством: Девять простых уроков. – М. : Экономика, 1988. – 251 с.
104. Алексеев Б.А. Контроль состояния (диагностика) крупных силовых трансформаторов. – М. : Издательство НЦ ЭНАС, 2002. – 216 с.
105. Перегудов Ф.И., Тарасенко Ф.П. Основа системного анализа. – Томск : Издательство НТЛ, 2001. – 396 с.
106. Карпов А.Г. Математические основы теории систем : учеб. пособие. – Томск : Издательство ТМЛ-Пресс, 2013. – 316 с.
107. Антонов А.В. Системный анализ. – М. : Высш. шк., 2008. – 454 с.
108. Давние В.В. Прогнозные модели экспертных предпочтений : монография / В. В. Давние, В. И. Тинякова. – Воронеж: изд-во Воронеж. гос. ун-та, 2005. – 248 с.
109. Шпет Н.А., Муравлёв О.П. Оценка эксплуатационной надежности технических устройств по цензурированным данным // Свидетельство № 2014618241. 2014. Бюл. № 9 (95).
110. Ефремов Л.В. Практика вероятностного анализа надежности техники с применением компьютерных технологий. – СПб. : Наука, 2008. – 216 с.
111. 0601.00.00.000 РЭ Лифт пассажирский. Руководство по эксплуатации. – М. : ОАО "Щербинский лифтостроительный завод", 2010. – 176 с.
112. Янковски Л. Проектирование механического оборудования лифтов / пер. с англ. под ред. С.Д. Бабичева. – М. : Изд-во АСВ, 2005. – 336 с.
113. Камышев А.Г. Грузовые и пассажирские лифты. Электрооборудование. М.-Л. : Госэнергоиздат, 1963. – 64 с.
114. Павлов В.Г. Лифты и подъемники. М.-Л. : Машиностроение, 1965, – 204 с.

115. Пассажирские лифты / под ред. П.И. Чутчикова. – М. : Машиностроение, 1978. – 141 с.

116. Шпет Н.А. Структурная модель лифта для оценки его эксплуатационной надежности // XIX Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Современные техника и технологии" / Сборник трудов в 3-х томах. Т. 1. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – С. 361-362.

117. Веденеева Е.А. Функции и формулы Excel 2007. – СПб. : Питер, 2008. – 384 с.

118. Шпет Н.А. Анализ отказов асинхронных двигателей для лифтов в эксплуатации // Электромеханические преобразователи энергии : Материалы V Юбилейной Международной науч.-техн. конф. Имени Г.А. Сипайлова. 12-14 октября 2011 г. – Томск : ТПУ, 2011. – С. 25-28.

119. Беляев Ю.К. Статистические методы обработки результатов испытаний на надежность. – М. : Знание, 1982. – 97 с.

120. Шпет Н.А. Выбор системы показателей надежности асинхронных двигателей для лифтов // XVIII Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Современные техника и технологии" / Сборник трудов в 3-х томах. Т. 1. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – С. 409-410.

121. Шпет Н.А. Модели надежности лифтовых асинхронных двигателей при эксплуатации // Электромеханические преобразователи энергии: Материалы VI Международной науч.-техн. конф. (Томск 9-11 октября 2013 г.). – ТПУ, 2013. – С. 54-59.

122. Проектирование электрических машин: учеб. для вузов / И.П. Копылов, Б.К. Клоков, В.П. Морозкин, Б.Ф. Токарев. Под редакцией И.П. Копылова. – 3-е изд. перераб. и доп. – М. : Высшая школа, 2002. – 757 с.

123. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов : пер. с нем. / Под. ред. Г. Гроше, В. Циглера. М. : Наука, 1981. – 720 с.

124. Аронов И.З., Буртасов Е.И. Оценка надежности по результатам сокращенных испытаний. – М. : Изд-во стандартов, 1987. – 184 с.
125. Афифи А., Эйзен С. Статистический анализ: Подход с использованием ЭВМ / Пер. с англ. – М. : Мир, 1982. – 488 с.
126. Ведяшкин М.В. Компьютерная модель эксплуатационной надежности обмоток крановых асинхронных двигателей // Электричество. – 2012. – № 6 – с. 59-61.
127. Крушель Е.Г., Панфилов А.Э. Осваиваем Mathcad (первокурсникам, заочникам и не только...) : учеб. пособ. – Волгоград : ВолгГТУ, 2006. – 179 с.
128. Яньков В.Ю. Попов А.А. Бобырь Г.А. Решение прикладных задач в пакете "МАТКАД". – М. : Спутник+, 2011. – 140 с.
129. Мозгалеvский А.В., Гаскаров Д.В. Техническая диагностика : учеб. пособ. для вузов. – М. : Высш. шк., 1975. – 207 с.
130. Шпет Н.А., Муравлёв О.П. Исследование отказов пассажирских лифтов по данным эксплуатации // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323, № 4 – С. 123-125.
131. 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.
132. ГОСТ 520–2011 Подшипники качения. Общие технические условия. – Введ. 2012-07-01. – М. : Федеральное агентство по техническому регулированию и технологии : Стандартинформ, 2012. – 66 с.
133. ГОСТ 21424–93 Муфты упругие втулочно-пальцевые. Параметры и размеры. – Введ. 1996-07-01. – Минск : Межгосударственный совет по организации, метрологии и сертификации : Изд-во стандартов, 2002. – 10 с.
134. ГОСТ 3325–85 Подшипники качения. Поля допусков и технические требования к посадочным поверхностям валов и корпусов. Посадки. – Введ. 1987-01-01. – М. : Государственный комитет СССР по стандартам : Изд-во стандартов, 1994. – 104 с.

135. ГОСТ 8338–75 Подшипники шариковые радиальные однорядные. Основные размеры. – Введ. 1976-07-01. – М. : Государственный комитет СССР по стандартам : Изд-во стандартов, 2003. – 11 с.

136. ГОСТ 24810–2013 Подшипники качения. Внутренние зазоры. Введ. 2015-01-01. – М. : Федеральное агентство по техническому регулированию и технологии : Стандартинформ, 2014. – 18 с.

137. ГОСТ 17516–72 Изделия электротехнические. Условия эксплуатации в части воздействия механических факторов внешней среды. – Введ. 1973-07-01. – М. : Государственный комитет СССР по стандартам : Изд-во стандартов, 1980. – 18 с.

138. ГОСТ 3189–89 Подшипники шариковые и роликовые. Система условных обозначений. – Введ. 1991-01-01. – М. : Государственный комитет СССР по стандартам : Изд-во стандартов, 1990. – 11 с.

139. Асинхронные лифтовые двигатели с короткозамкнутым ротором с высотой оси вращения 160-225 мм. Руководство по эксплуатации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://se33.ru/lift-electric-drive/23-lift-electric-drive/94-instruction-manual-induction-motors-for-lifts.html> (дата обращения 25.12.2014).

140. Чутчиков П.И. Ремонт лифтов : учеб. пособ. для сред. проф.-тех. училищ. – М. : Стройиздат, 1983. – 271 с.

141. Шпет Н.А. Анализ технического обслуживания и ремонта лифтовых асинхронных двигателей // XX Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Современные техника и технологии" / Сборник трудов в 3-х томах. Т. 1. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – С. 281-282.

142. Ермишкин В.Г. Техническое обслуживание лифтов. – М. : Недра, 1977. – 326 с.

143. Бродский М.Г., Вишиевецкий И.М., Грейман Ю.В. Безопасная эксплуатация лифтов. – М. : Недра, 1975, – 260 с.

144. 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.

145. Наладка лифтов / В.П. Ермишкин, И.К. Нелидов, К.П. Коханов. – М. : Стройиздат, 1990. – 303 с.

146. Комплексный метод диагностики асинхронных двигателей на основе использования искусственных нейронных сетей [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.profiz.ru/se/4_2014/rol_remonta (дата обращения 26.12.2014).

147. <http://www.ekportal.ru/page-id-3103.html> (дата обращения 15.11.2014).

148. Токарев А.Н. Основы теории надежности и диагностика: учебник. – Барнаул: изд. АлтГТУ, 2008. – 168 с.

149. Власов А.Б., Мухин Е.А. Применение тепловизионной диагностики для оценки теплового состояния электрооборудования и температуры обмотки судовых электродвигателей // Вестник МГТУ. – 2010. – Т. 13, № 4/2 – С. 937-941.

150. Гуменюк В.М. Надежность и диагностика электротехнических систем : учеб. пособие для вузов. – Владивосток: изд-во Дальневост. гос. техн. ун-та, 2010. – 218 с.

151. Вибрация в технике. Справочник в 6-ти томах. Под ред. К.В. Фролова. Том 1-6. – М. : Машиностроение, 1981.

152. Браташ О.В., Калинов А.П. Анализ методов вибродиагностики асинхронных двигателей [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://vibrosmart.ru/index.php/allvibro/18-2013-09-11-11-10-01> (дата обращения 15.03.2015).

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Таблица П.1.1. Коды и описание аварийных ситуаций пассажирских лифтов

Код ошибки	Описание аварийной ситуации
1	2
41	Отсутствие напряжения питания +24 В
42	Одновременное присутствие сигналов от датчика точной остановки и датчика замедления
43	Размыкание цепи контроля аппаратов безопасности
44	"Охрана шахты"
45	Отсутствие импульсов от датчика перемещения кабины
46	Размыкание блокировочной цепи кабины или блокировочной цепи замков дверей шахты для неподвижной кабины, находящейся в зоне точной остановки
47	Срабатывание узла тепловой защиты двигателя лебедки. Возможные причины: – перегрев статорных обмоток двигателя лебедки; – обрыв или короткое замыкание датчика температурной защиты; – неисправность датчика температурной защиты; – неисправность микропроцессорной платы управления
48	Восемь реверсов электродвигателя привода дверей кабины
49	Превышение контрольного времени включения привода дверей на открытие
50	Превышение контрольного времени включения привода дверей на закрытие
51	Четырехкратная неудачная попытка пуска лифта из зоны точной остановки
52	Превышение контрольного времени движения кабины в зоне точной остановки. Возможные причины: – неисправность пускателей привода лебедки; – неисправность тормоза; – неисправность клеммных соединений
53	Превышение контрольного времени движения кабины между двумя соседними остановками
54	Установка переключателя на посту ревизии в положение "КЛЮЧ ВЫНУТ" без режима "РЕВИЗИЯ" на УКЛ
55	Разрыв блокировочной цепи дверей кабины в движении

Продолжение табл. П.1.1

1	2
56	Отсутствие сигнала о выключении пускателей привода лебедки. Возможные причины: – заклинивание, при выключении, одного из пускателей привода лебедки; – неисправность (постоянное замыкание) одного из ключей переменного тока платы, предназначенной для управления пускателями привода лебедки; – неисправность (постоянное размыкание) цепи обратной связи пускателей привода лебедки; – неисправность микропроцессорной платы управления
57	Отсутствие сигнала о выключении пускателей привода дверей
58	Нажатие кнопки "ОТМЕНА"
59	Одновременное поступление сигнала от выключателя открытия дверей и выключателя закрытия дверей
60-68	Неисправность микропроцессорной платы управления
69	Наличие сигнала "90%" без сигнала "15 кг". Неисправность подпольного выключателя "90%"
70-78	Неисправность микропроцессорной платы управления
79	Наличие сигнала "110%" без сигнала "90%". Неисправность подпольного выключателя "110%" либо "90%"
80-88	Неисправность микропроцессорной платы управления
89	Время движения между остановками меньше 1,7 сек
90	Отсутствие сигнала от платы контроля фаз. Возможные причины: – отсутствие одной фазы питающего напряжения; – неправильная фазировка сети; – неисправность платы контроля фаз; – неисправность внешнего монтажа
91-98	Неисправность микропроцессорной платы управления
99	Пожарная или сейсмическая опасность

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Таблица П.2.1. Статистические данные по наработке АД для лифтов

№ лифта	Изготовитель	Дата установки	Кол-во этажей	Наработка, ч	Длительность простоя, ч	Причина отказа
1	2	3	4	5	6	7
1	СЛЗ	18.01.1986	9	26150	11	Перегрев АДЛ
2	СЛЗ	18.01.1986	9	14131	1	Срабатывание ДТЗ
3	СЛЗ	18.01.1986	9	22232	5	Ослабление крепления лобовых частей ОС
4	СЛЗ	18.01.1986	9	23332	14	Межвитковое замыкание ОС
5	СЛЗ	18.01.1986	9	20151	1	Срабатывание ДТЗ
6	СЛЗ	12.05.1986	9	26232	—	—
7	КМЗ	12.05.1986	9	26232	—	—
8	СЛЗ	13.05.1986	9	25265	32	Ослабление прессовки сердечника статора
9	КМЗ	13.05.1986	9	26232	—	—
10÷11	СЛЗ	13.05.1986	9	26232	—	—
12	СЛЗ	12.06.1986	9	26232	—	—
13	СЛЗ	25.07.1986	9	232	3	Ослабление крепления лобовых частей ОС
14	СЛЗ	25.07.1986	9	26232	—	—
15	СЛЗ	25.07.1986	9	26220	27	Пробой пазовой изоляции ОС
16	СЛЗ	25.07.1986	9	26232	—	—
17	КМЗ	25.07.1986	9	24737	69	Перегрузка, перегрев АДЛ
18	КМЗ	25.07.1986	9	6238	14	Увлажнение ОС
19	КМЗ	25.07.1986	9	26232	—	—
20	СЛЗ	28.07.1986	9	4298	23	Увлажнение ОС
21÷22	СЛЗ	20.08.1986	9	26232	—	—
23÷27	СЛЗ	06.11.1986	9	26232	—	—
28	СЛЗ	06.11.1986	9	18540	4	Перегрев АДЛ
29÷30	СЛЗ	06.11.1986	9	26232	—	—
31	КМЗ	18.11.1986	9	26232	—	—
32	КМЗ	18.11.1986	9	10018	19	Увлажнение ОС
33	СЛЗ	20.11.1986	9	26232	—	—
34÷35	СЛЗ	12.12.1986	9	26232	—	—
36	СЛЗ	03.02.1987	9	26232	—	—
37	СЛЗ	20.05.1987	9	26232	—	—
38÷39	СЛЗ	19.06.1987	9	26232	—	—
40	СЛЗ	26.08.1987	9	26232	—	—
41	МЛЗ	26.08.1987	9	9232	6	Перегрев ОС
42	МЛЗ	26.08.1987	9	22328	3	
43	СЛЗ	26.08.1987	9	26232	—	—

Продолжение табл. П.2.1

1	2	3	4	5	6	7
44	СЛЗ	26.08.1987	9	1305	1	Срабатывание ДТЗ
45÷46	СЛЗ	24.10.1987	9	26232	–	–
47	СЛЗ	24.10.1987	8	18394	8	Перегрев ОС
48÷49	СЛЗ	24.10.1987	8	26232	–	–
50	СЛЗ	24.10.1987	8	20997	1	Срабатывание ДТЗ
51	КМЗ	24.10.1987	8	26232	–	–
52÷57	СЛЗ	22.12.1987	9	26232	–	–
58	СЛЗ	22.12.1987	9	13896	22	Износ подшипника
59÷60	СЛЗ	05.01.1988	9	26232	–	–
61	СЛЗ	05.01.1988	9	14470	1	Срабатывание ДТЗ
62	СЛЗ	05.01.1988	9	26232	–	–
63÷66	СЛЗ	18.03.1988	9	26232	–	–
67÷71	СЛЗ	01.04.1988	9	26232	–	–
72	СЛЗ	14.04.1988	10	26232	–	–
73	СЛЗ	14.04.1988	10	12349	1	Срабатывание ДТЗ
74÷76	СЛЗ	14.04.1988	10	26232	–	–
77	СЛЗ	14.04.1988	10	8152	9	Межфазное замыкание ОС
78	СЛЗ	18.04.1988	10	26232		
79	СЛЗ	18.04.1988	10	12069	1	Срабатывание ДТЗ
80÷81	МЛЗ	09.06.1988	9	26232	–	–
82	СЛЗ	12.07.1988	9	26232	–	–
83	СЛЗ	12.07.1988	9	26232	–	–
84	СЛЗ	15.07.1988	9	26232	–	–
85	СЛЗ	01.09.1988	9	26232	–	–
86	СЛЗ	01.09.1988	10	26232	–	–
87	СЛЗ	01.09.1988	10	1450	12	Увлажнение ОС
88	СЛЗ	09.03.1989	10	21467	16	Увлажнение ОС
89	СЛЗ	27.03.1989	9	13365	1	Срабатывание ДТЗ
90	СЛЗ	29.05.1989	9	12470	1	
91	СЛЗ	14.09.1989	9	3609	7	Ослабление прессовки сердечника ОС
92	СЛЗ	14.09.1989	9	16483	1	Срабатывание ДТЗ
93	СЛЗ	30.01.1989	10	26232	–	–
94	СЛЗ	06.02.1989	9	26232	–	–
95÷96	СЛЗ	07.02.1989	9	26232	–	–
97	СЛЗ	08.01.1990	9	26232	–	–
98	СЛЗ	08.01.1990	9	26230	3	Перегрузка, перегрев ОС
99	СЛЗ	20.02.1990	10	2232	28	Увлажнение ОС
100	СЛЗ	20.02.1990	10	26232	–	–
101	СЛЗ	20.02.1990	10	26232	–	–
102	СЛЗ	20.02.1990	9	25232	13	Перегрев ОС

Продолжение табл. П.2.1

1	2	3	4	5	6	7
103	СЛЗ	20.03.1990	9	26232	–	–
104	СЛЗ	29.03.1990	9	1281	7	Межвитковое замыкание ОС
105	СЛЗ	29.03.1990	9	26232	–	–
106÷107	СЛЗ	13.04.1990	10	26232	–	–
108÷109	СЛЗ	13.04.1990	9	26232	–	–
110÷111	СЛЗ	20.04.1990	10	26232	–	–
112÷113	СЛЗ	16.05.1990	10	26232	–	–
114÷115	СЛЗ	20.05.1990	10	26232	–	–
116	СЛЗ	20.06.1990	9	26232	–	–
117÷119	СЛЗ	21.06.1990	10	26232	–	–
120÷121	СЛЗ	23.01.1991	9	26232	–	–
122	СЛЗ	23.01.1991	9	8337	8	Межвитковое замыкание ОС
123÷124	СЛЗ	23.01.1991	9	26232	–	–
125÷129	СЛЗ	14.05.1991	10	26232	–	–
130	СЛЗ	22.05.1991	10	12660	3	Вибрация, ослабление крепления АД
131	СЛЗ	22.05.1991	10	26232	–	–
132÷135	СЛЗ	29.05.1991	10	26232	–	–
136	ЩЛЗ	21.06.1991	14	26232	–	–
137	КМЗ	21.06.1991	14	26232	–	–
138÷139	СЛЗ	03.09.1991	10	26232	–	–
140÷141	СЛЗ	04.09.1991	10	26232	–	–
142	СЛЗ	10.12.1991	9	26232	–	–
143	КМЗ	10.12.1991	10	26232	–	–
144	КМЗ	10.12.1991	10	26232	–	–
145÷149	СЛЗ	10.12.1991	9	26232	–	–
150	СЛЗ	07.02.1992	9	8963	2	Ослабление крепления лобовых частей ОС
151÷153	СЛЗ	18.03.1992	9	26232	–	–
154÷155	СЛЗ	12.10.1992	10	26232	–	–
156	СЛЗ	26.10.1992	10	26232	–	–
157	СЛЗ	03.01.1993	10	16569	8	Разбит замок крышки
158	СЛЗ	03.01.1993	10	12204	5	Увлажнение ОС
159	СЛЗ	03.01.1993	10	26232	–	–
160	СЛЗ	11.05.1993	10	16594	3	Нарушение пазовой изоляции ОС
161	СЛЗ	13.05.1993	10	26232	–	–
162÷163	СЛЗ	04.06.1993	9	26232	–	–
164	СЛЗ	19.11.1993	10	26232	–	–
165÷166	СЛЗ	10.01.1994	10	26232	–	–
167÷168	СЛЗ	15.01.1994	9	26232	–	–
169÷170	СЛЗ	01.02.1994	10	26232	–	–
171	МЛЗ	02.02.1994	10	26232	–	–

Продолжение табл. П.2.1

1	2	3	4	5	6	7
172÷173	СЛЗ	10.02.1994	9	26232	–	–
174	МЛЗ	16.02.1994	10	26232	–	–
175	СЛЗ	01.03.1994	10	26232	–	–
176÷177	СЛЗ	01.04.1994	10	26232	–	–
178÷180	СЛЗ	01.05.1994	10	26232	–	–
181	СЛЗ	30.05.1994	10	14586	54	Дисбаланс ротора
182	СЛЗ	30.05.1994	10	14640	14	Увлажнение ОС
183÷185	СЛЗ	30.05.1994	10	26232	–	–
186	КМЗ	25.01.1995	9	26040	3	Перегрев ОС
187	КМЗ	25.01.1995	9	26232	–	–
188÷189	МЛЗ	08.02.1995	10	26232	–	–
190	МЛЗ	08.02.1995	10	9523	5	Перегрев ОС
191÷192	КМЗ	15.05.1995	9	26232	–	–
193÷195	СЛЗ	05.07.1995	10	26232	–	–
196÷197	СЛЗ	25.07.1995	9	26232	–	–
198	СЛЗ	03.08.1995	10	20265	2	Срабатывание ДТЗ
199	СЛЗ	03.08.1995	10	26232	–	–
200÷201	СЛЗ	10.10.1995	10	26232	–	–
202÷203	СЛЗ	25.12.1995	10	26232	–	–
204	СЛЗ	19.01.1996	10	2722	28	Разрушение подшипника
205	КМЗ	19.02.1996	10	26232	–	–
206	СЛЗ	04.04.1996	10	26232	–	–
207	КМЗ	08.04.1996	10	16099	1	Срабатывание ДТЗ
208	КМЗ	08.04.1996	10	26232	–	–
209	КМЗ	08.04.1996	10	15523	1	Срабатывание ДТЗ
210	КМЗ	08.04.1996	10	26232	–	–
211÷212	СЛЗ	05.05.1996	9	26232	–	–
213	СЛЗ	19.07.1996	10	26232	–	–
214	СЛЗ	28.08.1996	10	26232	–	–
215	ОЛЗ	13.02.1997	10	26232	–	–
216÷217	СЛЗ	13.02.1997	10	26232	–	–
218	ЩЛЗ	19.05.1997	8	26232	–	–
219÷221	КМЗ	22.09.1997	10	26232	–	–
222	ЩЛЗ	11.11.1997	9	26232	–	–
223	ЩЛЗ	09.12.1997	9	9635	5	Недостаточно смазки в подшипнике
224÷225	МЛЗ	16.02.1998	10	26232	–	–
226÷227	СЛЗ	12.10.1998	8	26232	–	–
228	СЛЗ	12.10.1998	10	26232	–	–
229	КМЗ	01.12.1998	10	13073	5	Ослабление крепления АДЛ
230	КМЗ	01.12.1998	10	4193	1	Срабатывание ДТЗ
231	КМЗ	01.12.1998	10	13312	1	Срабатывание ДТЗ

Продолжение табл. П.2.1

1	2	3	4	5	6	7
232÷233	СЛЗ	05.07.1999	10	26232	–	–
234	СЛЗ	05.07.1999	10	18042	79	Межвитковое замыкание ОС
235÷236	СЛЗ	05.07.1999	10	26232	–	–
237÷240	СЛЗ	27.07.1999	10	26232	–	–
241÷243	КМЗ	15.08.1999	9	26232	–	–
244÷247	МЛЗ	02.09.1999	9	26232	–	–
248÷251	СЛЗ	13.10.1999	10	26232	–	–
252÷255	СЛЗ	29.11.1999	9	26232	–	–
256	СЛЗ	04.04.2000	10	17004	6	Нарушение пазовой изоляции ОС
257	СЛЗ	04.04.2000	10	26232	–	–
258	СЛЗ	04.04.2000	10	2795	3	Недостаточно смазки в подшипнике
259	СЛЗ	09.10.2000	9	26232	–	–
260	СЛЗ	09.10.2000	9	26230	21	Увлажнение ОС
261	КМЗ	09.10.2000	10	10569	2	Перегрев ОС
262	КМЗ	03.04.2001	10	12801	6	Вибрация, ослабление крепления АД
263	КМЗ	03.04.2001	10	26232	–	–
264	КМЗ	03.04.2001	10	18907	18	Заклинивание ротора
265	КМЗ	23.04.2001	10	5877	1	Срабатывание ДТЗ
266	КМЗ	14.05.2001	10	26232	–	–
267	КМЗ	14.05.2001	10	17995	1	Срабатывание ДТЗ
268÷269	КМЗ	14.05.2001	10	26232	–	–
270÷271	КМЗ	16.07.2001	9	26232	–	–
272	КМЗ	09.10.2001	10	3662	14	Дефект выходного конца вала
273	КМЗ	09.10.2001	10	26232	–	–
274÷275	ОЛЗ	03.06.2002	10	26232	–	–
276	КМЗ	17.09.2002	10	26232	–	–
277	МЛЗ	17.09.2002	10	26232	–	–
278	КМЗ	17.09.2002	10	26232	–	–
279	СЛЗ	01.10.2002	10	26232	–	–
280	ОЛЗ	18.12.2002	10	26232	–	–
281÷283	КМЗ	15.03.2003	9	26232	–	–
284÷286	КМЗ	03.04.2003	10	26232	–	–
287÷289	КМЗ	16.06.2003	9	26232	–	–
290	ОЛЗ	25.09.2003	10	26232	–	–
291	ОЛЗ	25.09.2003	10	20465	21	Дисбаланс ротора
292	ОЛЗ	25.09.2003	10	3129	11	Износ подшипника
293÷295	ОЛЗ	21.10.2003	10	26232	–	–
296	ОЛЗ	29.10.2003	10	26232	–	–

Продолжение табл. П.2.1

1	2	3	4	5	6	7
297÷298	ЩЛЗ	15.11.2003	9	26232	–	–
299	ЩЛЗ	18.12.2003	9	26232	–	–
300	КМЗ	18.12.2003	9	26232	–	–
301÷302	ЩЛЗ	18.12.2003	9	26232	–	–
303	ОЛЗ	18.12.2003	10	26232	–	–
304÷305	ЩЛЗ	19.12.2003	9	26232	–	–
306	КМЗ	19.12.2003	9	26232	–	–
307	ЩЛЗ	19.12.2003	9	26232	–	–
308	ОЛЗ	30.12.2003	10	26232	–	–
309÷310	ЩЛЗ	25.01.2004	9	26232	–	–
311÷312	ЩЛЗ	28.01.2004	9	26232	–	–
313	ОЛЗ	10.02.2004	10	26232	–	–
314÷316	ОЛЗ	13.02.2004	9	26232	–	–
317÷318	ОЛЗ	19.03.2004	9	26232	–	–
319	ОЛЗ	19.03.2004	9	15228	6	Срабатывание ДТЗ
320÷321	КМЗ	04.04.2004	9	26232	–	–
322÷323	КМЗ	08.04.2004	9	26232	–	–
324÷327	ЩЛЗ	27.05.2004	10	26232	–	–
328	ОЛЗ	03.06.2004	10	26232	–	–
329	ОЛЗ	14.07.2004	9	1070	23	Наличие постороннего предмета в статоре
330	ОЛЗ	14.07.2004	9	14112	1	Срабатывание ДТЗ
331	ЩЛЗ	10.08.2004	9	26232	–	–
332	ЩЛЗ	31.08.2004	9	26232	–	–
333	КМЗ	31.08.2004	9	2870	3	Не установлено
334	ОЛЗ	05.10.2004	10	26232	–	–
335÷336	ОЛЗ	08.11.2004	10	26232	–	–
337÷338	КМЗ	18.12.2004	9	26232	–	–
339	КМЗ	26.04.2005	9	26232	–	–
340	КМЗ	27.05.2005	9	4094	15	Шум в подшипнике
341	КМЗ	30.05.2005	9	26202	22	Увлажнение ОС
342	КМЗ	30.05.2005	9	15973	1	Срабатывание ДТЗ
343	ОЛЗ	15.08.2005	9	26232	–	–
344÷346	КМЗ	12.10.2005	9	26232	–	–
347÷348	КМЗ	31.10.2005	9	26232	–	–
349÷350	КМЗ	25.11.2005	11	26232	–	–
351	КМЗ	28.03.2006	9	22424	1	Срабатывание ДТЗ
352	КМЗ	28.03.2006	9	12299		
353	КМЗ	17.04.2006	10	26232	–	–
354	КМЗ	17.04.2006	10	4725	1	Срабатывание ДТЗ
355	ЩЛЗ	27.04.2006	10	26232	–	–
356	ЩЛЗ	07.06.2006	10	26232	–	–

Продолжение табл. П.2.1

1	2	3	4	5	6	7
357÷358	КМЗ	24.08.2006	9	26232	–	–
359	КМЗ	12.09.2006	9	26232	–	–
360	МЛЗ	27.11.2006	17	26232	–	–
361	КМЗ	28.11.2006	17	26232	–	–
362÷363	ОЛЗ	12.12.2006	9	26232	–	–
364	КМЗ	22.12.2006	9	26232	–	–
365	КМЗ	22.12.2006	9	3131	1	Срабатывание ДТЗ
366	КМЗ	22.12.2006	9	26232	–	–
367	КМЗ	28.12.2006	14	26232	–	–
368	КМЗ	15.02.2007	14	12212	1	Срабатывание ДТЗ
369	КМЗ	06.03.2007	10	17797	18	Дефект выходного конца вала
370	КМЗ	25.12.2007	10	26232	–	–
371	КМЗ	21.01.2008	10	26232	–	–
372	КМЗ	18.02.2008	14	26232	–	–
373÷375	КМЗ	25.03.2008	9	26232	–	–
376	КМЗ	27.03.2008	9	8233	9	Срабатывание ДТЗ
377	КМЗ	11.04.2008	10	26232	–	–
378	КМЗ	13.08.2008	17	26232	–	–
379	МЛЗ	21.10.2008	5	26232	–	–
380	КМЗ	24.10.2008	10	26232	–	–
381	КМЗ	08.12.2008	11	26232	–	–
382	ЩЛЗ	11.12.2008	11	16018	6	Межвитковое замыкание ОС
383	КМЗ	16.12.2008	9	26232	–	–
384	КМЗ	26.02.2009	10	18647	8	Срабатывание ДТЗ
385	ОЛЗ	03.04.2009	10	26232	–	–
386÷387	КМЗ	04.06.2009	10	26232	–	–
388÷389	КМЗ	11.09.2009	10	26232	–	–
390	ЩЛЗ	02.03.2010	10	26232	–	–
391	КМЗ	25.03.2010	15	858	4	Срабатывание ДТЗ
392	КМЗ	25.03.2010	15	836	1	
393	КМЗ	26.03.2010	15	26232	–	–
394	ЩЛЗ	28.06.2010	9	26232	–	–
395÷396	ЩЛЗ	29.06.2010	9	26232	–	–
397	ЩЛЗ	18.07.2010	7	5897	1	Срабатывание ДТЗ
398÷399	ЩЛЗ	28.07.2010	9	26232	–	–
400	ЩЛЗ	03.08.2010	9	26232	–	–
401	ЩЛЗ	16.08.2010	9	26232	–	–
402	ЩЛЗ	21.09.2010	9	4424	1	Срабатывание ДТЗ
403	ЩЛЗ	27.09.2010	10	26232	–	–
404	ЩЛЗ	04.10.2010	9	26232	–	–
405	ЩЛЗ	07.10.2010	10	13366	1	Срабатывание ДТЗ

Продолжение табл. П.2.1

1	2	3	4	5	6	7
406÷407	ЩЛЗ	27.12.2010	9	21312	–	–
408	ЩЛЗ	11.03.2011	9	19536	–	–
409	ЩЛЗ	15.03.2011	10	5303	1	Срабатывание ДТЗ
410	ЩЛЗ	15.03.2011	10	5604	6	Ослабление крепления лобовых частей ОС
411	ЩЛЗ	07.04.2011	11	18888	–	–
412	ЩЛЗ	28.04.2011	9	18384	–	–
413	ЩЛЗ	16.05.2011	10	374	1	Срабатывание ДТЗ
414	ЩЛЗ	01.06.2011	10	17568	–	–
415	ЩЛЗ	01.06.2011	10	18648	12	Шум в подшипнике
416	ЩЛЗ	01.06.2011	10	17568	–	–
417	ЩЛЗ	11.07.2011	9	16608	–	–
418÷419	ЩЛЗ	12.07.2011	9	16584	–	–
420	ЩЛЗ	20.07.2011	9	16392	–	–
421	ЩЛЗ	20.07.2011	9	5531	2	Перегрузка, перегрев ОС
422	ЩЛЗ	20.07.2011	9	16392	–	–
423	ЩЛЗ	26.07.2011	9	16248	–	–
424	ЩЛЗ	26.07.2011	9	2968	1	Срабатывание ДТЗ
425	ЩЛЗ	26.07.2011	9	2962	2	
426	ЩЛЗ	26.07.2011	9	16248	–	–
427	МЛЗ	01.08.2011	10	2222	2	Срабатывание ДТЗ
428÷432	МЛЗ	01.08.2011	15	16104	–	–
433÷434	ЩЛЗ	15.08.2011	9	15768	–	–
435	ЩЛЗ	22.08.2011	9	15600	–	–
436÷439	МЛЗ	01.09.2011	15	15360	–	–
440	КМЗ	01.10.2011	14	14640	–	–
441÷442	КМЗ	31.10.2011	10	13920	–	–
443	ЩЛЗ	08.12.2011	10	13008	–	–
444	ЩЛЗ	09.12.2011	12	12984	–	–
445÷446	ЩЛЗ	12.12.2011	9	12912	–	–

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

ЛИСТИНГ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

ORIGIN := 1

Оценка эксплуатационной надежности технических устройств по цензурированным данным

1. Предварительная обработка исходных данных

T := READPRN("files/86-90.txt")

N := rows(T)

T := csort(T, 1)

$\tau := T^{(1)}$

$a := T^{(2)}$

Определение числа цензурирований слева

$$k(A, c) := \left| \begin{array}{l} n \leftarrow 1 \\ \text{while } A_n < c \\ \quad n \leftarrow n + 1 \\ n - 1 \end{array} \right.$$

k0 := k(a, 1)

k0 = ■ ■

Разделение массива с исходными данными на два: наработки до отказа и наработки до цензурирования

$$\text{razdelenie}(T, \text{uslovie}) := \left| \begin{array}{l} i \leftarrow 1 \\ T2 \leftarrow (0 \ 0) \\ m \leftarrow \text{rows}(T) \\ \text{while } i \leq m \\ \quad \left| \begin{array}{l} \text{if } (T^{(2)})_i = \text{uslovie} \\ \quad \left| \begin{array}{l} \text{temp} \leftarrow \text{submatrix}(T, i, i, 1, 2) \\ T2 \leftarrow \text{stack}(T2, \text{temp}) \end{array} \right. \\ i \leftarrow i + 1 \end{array} \right. \\ n \leftarrow \text{rows}(T2) \\ \text{submatrix}(T2, 2, n, 1, 2) \end{array} \right.$$

Вектор наработок до отказа:

$$T1 := \text{razdelenie}(T, 1)$$

$$\tau1 := T1^{\langle 1 \rangle}$$

$$v1 := \text{length}(\tau1)$$

Вектор наработок до цензурирования:

$$T0 := \text{razdelenie}(T, 0)$$

$$\tau0 := T0^{\langle 1 \rangle}$$

$$v0 := \text{length}(\tau0)$$

$$kc := \text{if}(v0 = 0, 0, 1)$$

2. Преобразование координат исследуемой зависимости

$$j := k0 + 1 \dots N$$

$$i := 1 \dots 4$$

$$L := 2 \dots N$$

$$\Lambda_1 := \frac{a_1}{N}$$

$$S_L := \begin{cases} 0 & \text{if } L = 1 \\ L & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\Lambda_L := \left(\frac{a_L}{N - S_{L-1}} \right) + \Lambda_{L-1}$$

$$erj := 1 - \exp(-\Lambda_j)$$

Функции анаморфозы:

Экспоненциальная модель надежности

$$x_{j,1} := \Lambda_j$$

$$y_{j,1} := |\tau_j|$$

Модель надежности Вейбулла

$$x_{j,2} := \ln(\Lambda_j)$$

$$y_{j,2} := \ln(|\tau_j|)$$

Нормальная модель надежности

$$x_{j,3} := |\tau_j|$$

$$y_{j,3} := \text{qnorm}(\text{er}_j, 0, 1)$$

Логарифмически-нормальная модель надежности

$$x_{j,4} := \ln(|\tau_j|)$$

$$y_{j,4} := \text{qnorm}(\text{er}_j, 0, 1)$$

3. Приближенная оценка параметров моделей надежности

Параметры экспоненциальной модели надежности:

$$\text{tcp1} := \frac{\sum_{i=1}^N \tau_i}{\sum_j a_j}$$

$$\text{tcp1} = \blacksquare$$

$$\lambda_{e1} := \frac{1}{\text{tcp1}}$$

$$\lambda_{e1} = \blacksquare$$

Параметры модели надежности Вейбулла:

$$\beta_1 := \frac{(N - k_0) \cdot \sum_j (y_{j,2} \cdot x_{j,2}) - \left(\sum_j y_{j,2} \right) \cdot \sum_j x_{j,2}}{(N - k_0) \cdot \sum_j (y_{j,2})^2 - \left(\sum_j y_{j,2} \right)^2}$$

$$\beta_1 = \blacksquare$$

$$\alpha_1 := \exp \left[\frac{1}{N - k_0} \cdot \left(\sum_j x_{j,2} - \beta_1 \cdot \sum_j y_{j,2} \right) \right]$$

$$\alpha_1 = \blacksquare$$

Параметры нормальной модели надежности:

$$\sigma_1 := \frac{(N - k_0) \cdot \sum_j (y_{j,3} \cdot x_{j,3}) - \sum_j x_{j,3} \cdot \sum_j y_{j,3}}{(N - k_0) \cdot \sum_j (y_{j,3})^2 - \left(\sum_j y_{j,3} \right)^2}$$

$$\sigma_1 = \sqrt{\quad}$$

$$\mu_1 := \frac{1}{N - k_0} \cdot \left[\sum_j x_{j,3} - \sigma_1 \cdot \left(\sum_j y_{j,3} \right) \right]$$

$$\mu_1 = \sqrt{\quad}$$

Параметры логарифмически-нормальной модели надежности:

$$l\sigma_1 := \frac{(N - k_0) \cdot \sum_j (y_{j,4} \cdot x_{j,4}) - \sum_j y_{j,4} \cdot \sum_j x_{j,4}}{(N - k_0) \cdot \sum_j (y_{j,4})^2 - \left(\sum_j y_{j,4} \right)^2}$$

$$l\sigma_1 = \sqrt{\quad}$$

$$l\mu_1 := \frac{1}{N - k_0} \cdot \left(\sum_j x_{j,4} - l\sigma_1 \cdot \sum_j y_{j,4} \right)$$

$$l\mu_1 = \sqrt{\quad}$$

4. Расчет и построение гистограмм эмпирического распределения

$$\text{lower} := \min(\tau_1^{\langle 1 \rangle})$$

$$\text{upper} := \max(\tau_1^{\langle 1 \rangle})$$

Количество интервалов:

$$\text{bin} := \text{ceil}(5 \cdot \log(v_1))$$

Ширина интервала:

$$h := \frac{\text{upper} - \text{lower}}{\text{bin}}$$

$$h = \sqrt{\quad}$$

$j := 1 \dots \text{bin}$

$\text{tt}_j := \text{lower} + h \cdot j$

$\text{tm}_j := \text{tt}_j - \frac{h}{2}$

$\text{to}_j := \text{tt}_j - h$

Гистограммы:

$\text{f1emp} := \text{hist}(\text{stack}(0, \text{tt}), \tau_1)$

$\text{f0emp} := \text{hist}(\text{stack}(0, \text{tt}), \tau_0)$

$\text{cc}_j := (\text{v1} + \text{v0}) - \sum_{j=1}^j (\text{f0emp}_j + \text{f1emp}_j)$

$\text{bn} := \text{if}(\text{cc}_{\text{bin}} = 0, \text{bin} - 1, \text{bin})$

$k := 1 \dots \text{bn}$

Интенсивность отказов:

$$\lambda_{\text{emp}_k} := \frac{\text{f1emp}_k}{(\text{v0} + \text{v1}) - \sum_{k=1}^k (\text{f0emp}_k + \text{f1emp}_k)}$$

$$\lambda_{\text{empabs}_k} := \frac{\lambda_{\text{emp}_k}}{h}$$

Вероятность безотказной работы:

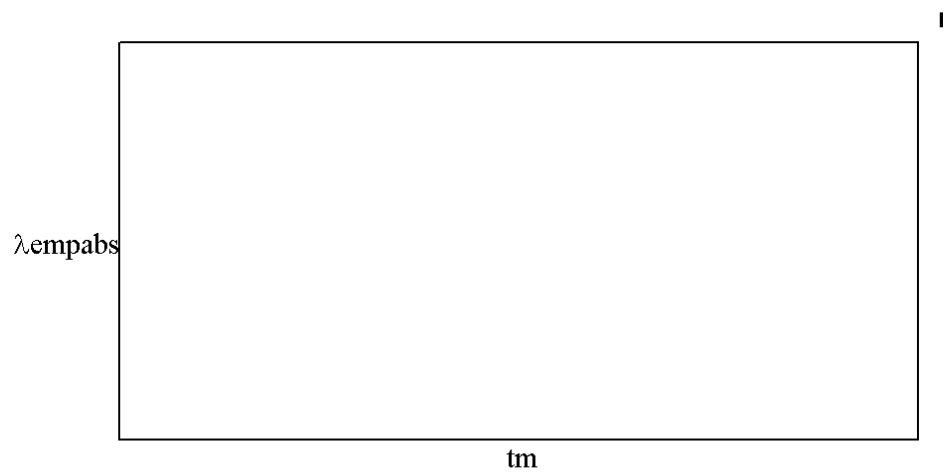
$$\text{Pemp}_k := \prod_{k=1}^k \frac{1}{1 + \lambda_{\text{emp}_k}}$$

Плотность распределения наработок:

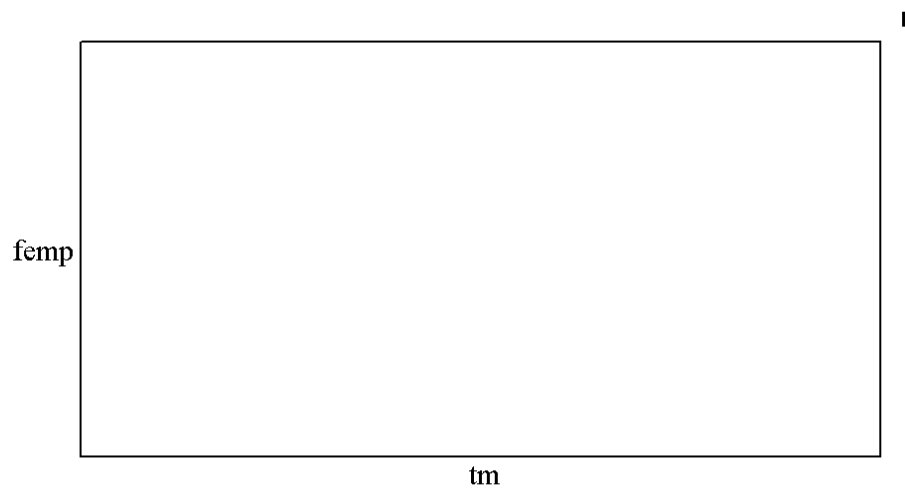
$\text{femp}_k := \lambda_{\text{emp}_k} \cdot \text{Pemp}_k$

$\text{fempabs}_k := \lambda_{\text{empabs}_k} \cdot \text{Pemp}_k$

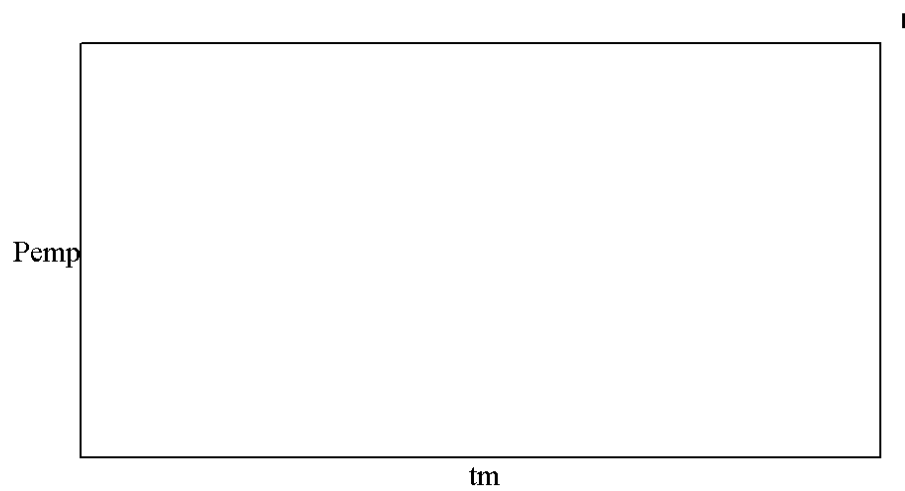
Гистограмма интенсивности отказов



Гистограмма плотности распределения наработок



Гистограмма вероятности безотказной работы



5. Уточнение параметров моделей надежности и построение их теоретических зависимостей по интервалам

Экспоненциальная модель надежности:

Given

$$0 = P_{\text{emp}} - \exp(-\lambda_{e1} \cdot t_{m1})$$

$$\lambda_e := \text{Minerr}(\lambda_{e1})$$

До коррекции:

$$\lambda_{e1} = \lambda_e$$

Уточненный:

$$\lambda_e = \lambda_e$$

Вероятность безотказной работы:

$$P_{E_k} := \exp(-\lambda_e \cdot t_{m_k})$$

Интенсивность отказов:

$$\lambda_{E_k} := \lambda_e$$

Плотность распределения наработок:

$$f_{E_k} := P_{E_k} \cdot \lambda_{E_k}$$

Математическое ожидание (средняя наработка до отказа):

$$t_{cp} := \frac{1}{\lambda_e}$$

$$T_E := t_{cp}$$

$$T_E = T_E$$

Коэффициент вариации:

$$V_E := 1$$

Модель надежности Вейбулла:

Given

$$0 = P_{\text{emp}} - \exp(-\alpha_1 \cdot t_{m1}^{\beta_1})$$

$$\begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} := \text{Minerr}(\alpha_1, \beta_1)$$

До коррекции:

$$\alpha_1 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{1}{t_k}$$

$$\beta_1 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{1}{t_k^2}$$

Уточненные:

$$\alpha = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{1}{t_k}$$

$$\beta = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{1}{t_k^2}$$

Вероятность безотказной работы:

$$PV_k := \exp\left[-\alpha \cdot (tm_k)^\beta\right]$$

Интенсивность отказов:

$$\lambda V_k := \beta \cdot \alpha \cdot (tm_k)^{\beta-1}$$

Плотность распределения наработок:

$$fV_k := PV_k \cdot \lambda V_k$$

Математическое ожидание (средняя наработка до отказа):

$$TV := \frac{\Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right)}{\alpha^{\frac{1}{\beta}}}$$

$$TV = \frac{1}{\alpha^{\frac{1}{\beta}}}$$

Коэффициент вариации:

$$V_v := \frac{\sqrt{\Gamma\left(\frac{2}{\beta} + 1\right) - \Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right)^2}}{\Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right)}$$

$$V_V = \frac{\sigma}{\mu}$$

Нормальная модель надежности:

Given

$$0 = P_{emp} - \text{snorm}\left[\frac{-(tm - \mu_1)}{\sigma_1}\right]$$

$$\begin{pmatrix} \mu \\ \sigma \end{pmatrix} := \text{Minerr}(\mu_1, \sigma_1)$$

До коррекции:

$$\begin{pmatrix} \mu_1 \\ \sigma_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mu \\ \sigma \end{pmatrix}$$

Уточненные:

$$\begin{pmatrix} \mu \\ \sigma \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mu_1 \\ \sigma_1 \end{pmatrix}$$

Вероятность безотказной работы:

$$PN_k := \text{snorm}\left[\frac{-(tm_k - \mu)}{\sigma}\right]$$

Плотность распределения наработок:

$$fN_k := \text{dnorm}(tm_k, \mu, \sigma)$$

Интенсивность отказов:

$$\lambda_{N_k} := \frac{fN_k}{PN_k}$$

Математическое ожидание (средняя наработка до отказа):

$$TN := \mu$$

$$TN = \frac{\mu}{\lambda}$$

Коэффициент вариации:

$$VN := \frac{\sigma}{\mu}$$

$$VN = \frac{1}{\sigma} \left(\frac{t - \mu}{\sigma} \right)$$

Логарифмически-нормальная модель надежности:

Given

$$0 = P_{emp} - (1 - plnorm(tm, l\mu, l\sigma))$$

$$\begin{pmatrix} l\mu \\ l\sigma \end{pmatrix} := Minerr(l\mu, l\sigma)$$

До коррекции:

$$\begin{pmatrix} l\mu_1 \\ l\sigma_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} l\mu \\ l\sigma \end{pmatrix}$$

Уточненные:

$$\begin{pmatrix} l\mu \\ l\sigma \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} l\mu_1 \\ l\sigma_1 \end{pmatrix}$$

Вероятность безотказной работы:

$$PL_k := 1 - plnorm(tm_k, l\mu, l\sigma)$$

Плотность распределения наработок:

$$fL_k := dlnorm(tm_k, l\mu, l\sigma)$$

Интенсивность отказов:

$$\lambda_{Lk} := \frac{fL_k}{PL_k}$$

Математическое ожидание (средняя наработка до отказа):

$$TL := \exp\left(l\mu + \frac{l\sigma^2}{2}\right)$$

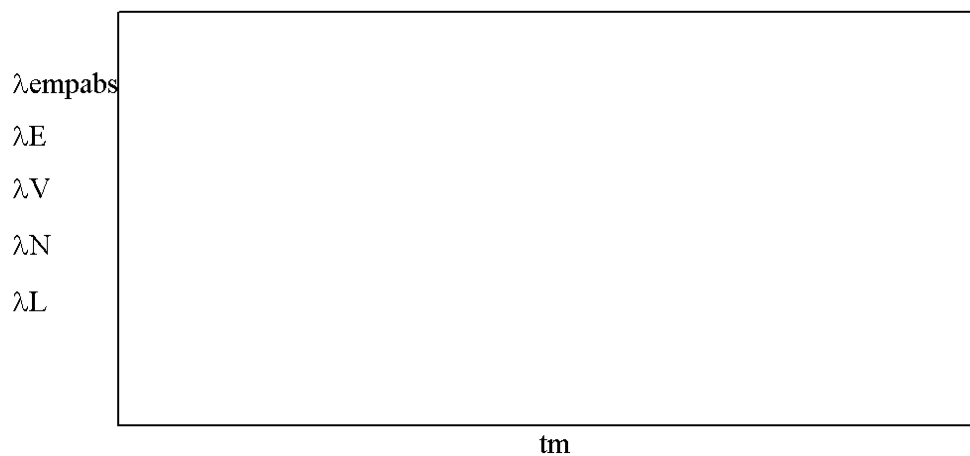
$$TL = \frac{1}{\lambda_{Lk}}$$

Коэффициент вариации:

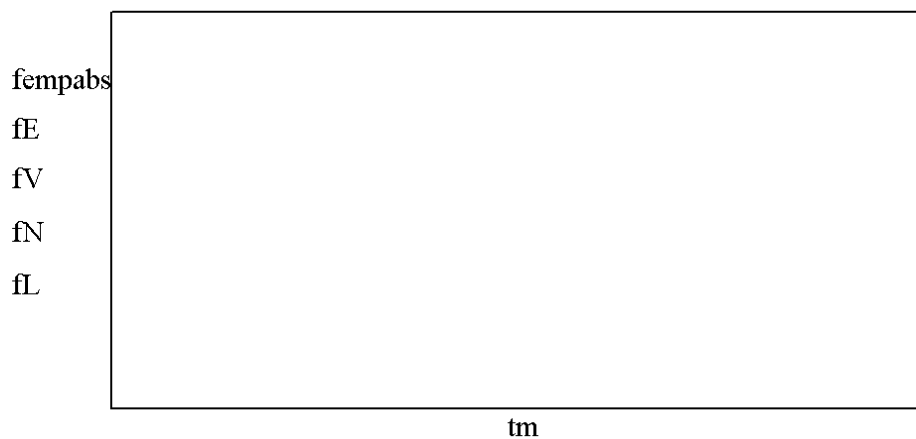
$$VL := \sqrt{\exp(l\sigma^2) - 1}$$

$$VL = \frac{\sigma}{\mu}$$

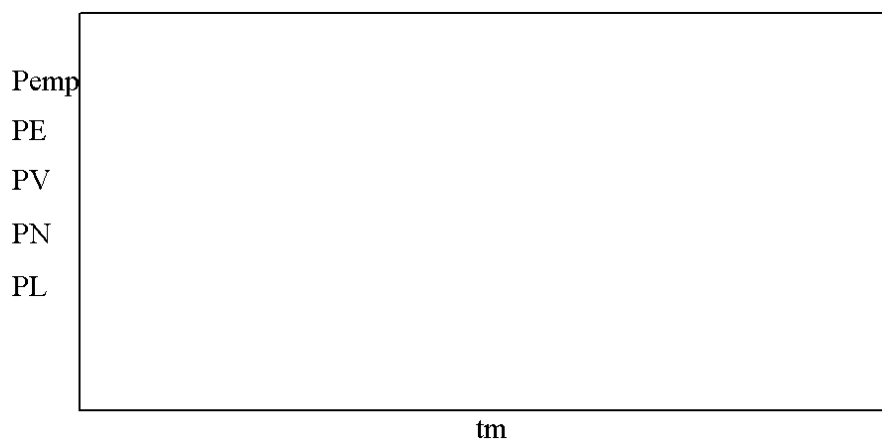
Интенсивность отказов (гистограмма эмпирического распределения и теоретическая зависимость, построенная по интервалам)



Плотность распределения наработок (гистограмма эмпирического распределения и теоретическая зависимость, построенная по интервалам)



Вероятность безотказной работы (гистограмма эмпирического распределения и теоретическая зависимость, построенная по интервалам)



6. Построение теоретических зависимостей моделей надежности по точкам

$$t := \text{if}(k_c > 0, \text{stack}(\tau_1, \tau_0), \tau_1)$$

Экспоненциальная модель надежности:

$$\lambda_e(t) := \frac{1}{\text{tcr}}$$

$$P_e(t) := \exp(-\lambda_e(t) \cdot t)$$

$$f_e(t) := P_e(t) \cdot \lambda_e(t)$$

Модель надежности Вейбулла:

$$\lambda_v(t) := \beta \cdot \alpha \cdot t^{\beta-1}$$

$$P_v(t) := \exp(-\alpha \cdot t^\beta)$$

$$f_v(t) := P_v(t) \cdot \lambda_v(t)$$

Нормальная модель надежности:

$$P_n(t) := \text{cnorm}\left[\frac{-(t - \mu)}{\sigma}\right]$$

$$f_n(t) := \text{dnorm}(t, \mu, \sigma)$$

$$\lambda_n(t) := \frac{f_n(t)}{P_n(t)}$$

Логарифмически-нормальная модель надежности:

$$P_l(t) := 1 - \text{plnorm}(t, l\mu, l\sigma)$$

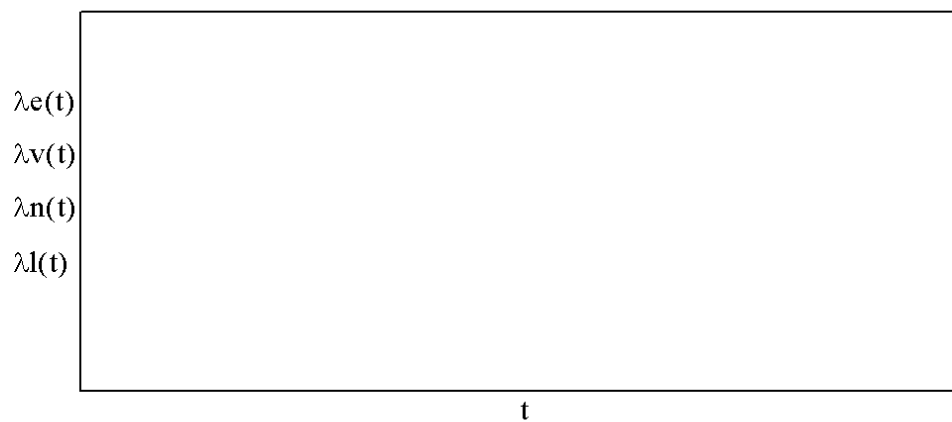
$$f_l(t) := \text{dlnorm}(t, l\mu, l\sigma)$$

$$\lambda_l(t) := \frac{f_l(t)}{P_l(t)}$$

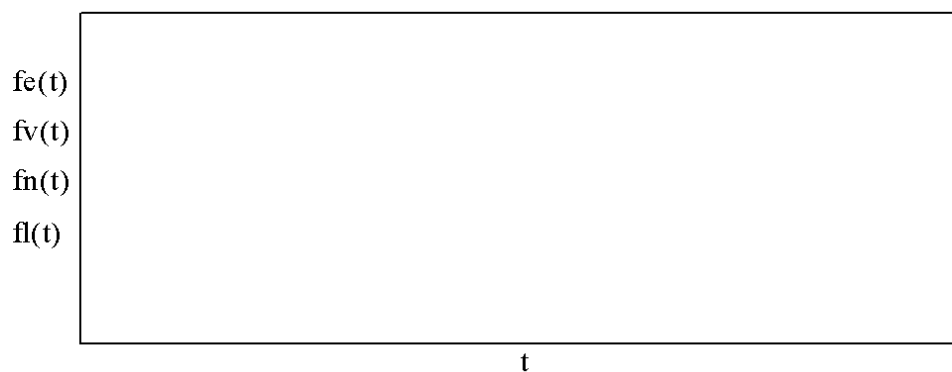
$$t := 0, \frac{\max(\tau) - \min(\tau)}{N} \dots \max(\tau) \cdot 1.2$$

Интенсивность отказов

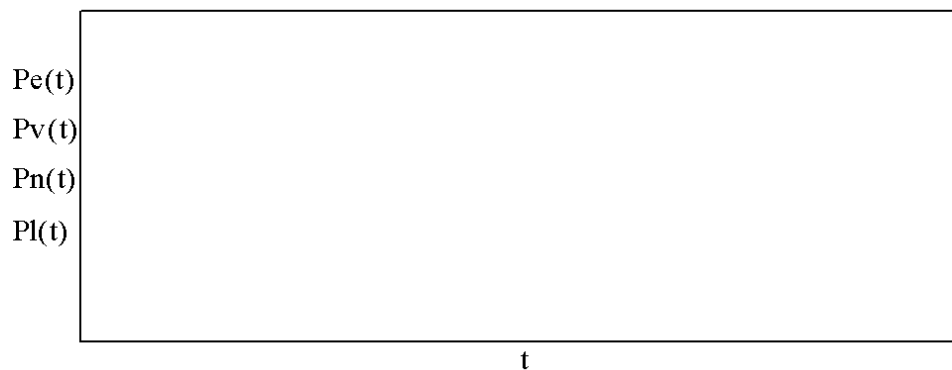
(теоретическая зависимость, построенная по точкам)

**Плотность распределения наработок**

(теоретическая зависимость, построенная по точкам)

**Вероятность безотказной работы**

(теоретическая зависимость, построенная по точкам)

**7. Определение коэффициентов корреляции**

Экспоненциальная модель надежности:

$$\text{Cor}_1 := \text{corr}\left(\overrightarrow{PE}, P_{\text{emp}}\right)$$

Модель надежности Вейбулла:

$$\text{Cor}_2 := \text{corr}\left(\overrightarrow{\text{PV}}, \text{Pemp}\right)$$

Нормальная модель надежности:

$$\text{Cor}_3 := \text{corr}\left(\overrightarrow{\text{PN}}, \text{Pemp}\right)$$

Логарифмически-нормальная модель надежности:

$$\text{Cor}_4 := \text{corr}\left(\overrightarrow{\text{PL}}, \text{Pemp}\right)$$

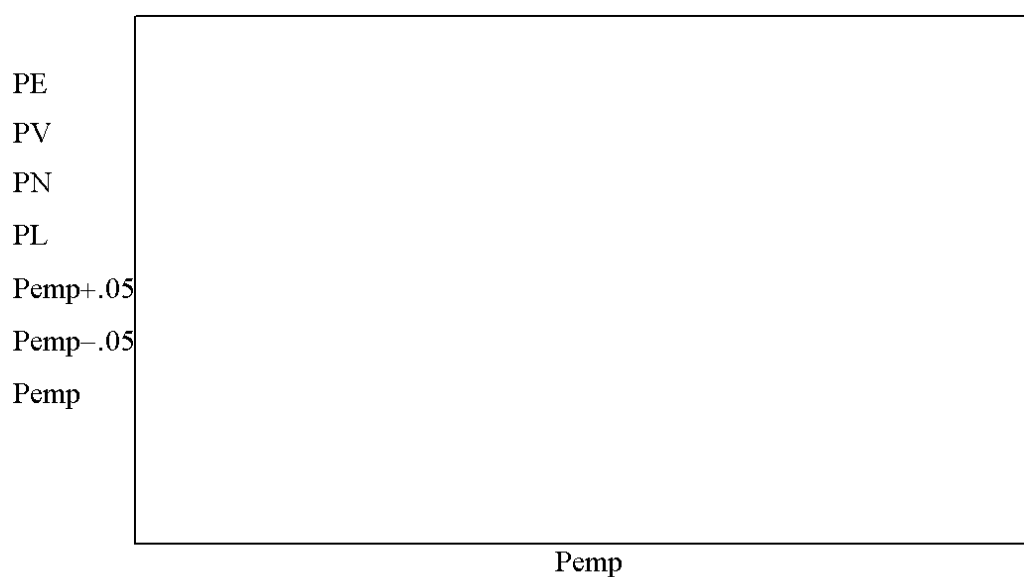
$$\text{zakon} := \begin{pmatrix} \text{"экспоненц."} \\ \text{"Вейбулла"} \\ \text{"нормал."} \\ \text{"логнормал."} \end{pmatrix}$$

Определение модели надежности с максимальным коэффициентом корреляции:

```
wh_zakon(Corr) :=  $\left\{ \begin{array}{l} \text{Cmax} \leftarrow \max(\text{Corr}) \\ i \leftarrow 1 \\ \text{while } \text{Corr}_i \neq \text{Cmax} \\ \quad i \leftarrow i + 1 \\ \text{zakon}_i \end{array} \right.$ 
```

wh_zakon(Cor) = ■ ■

Корреляционный график



$$\text{Names} := \begin{pmatrix} \text{"Закон"} \\ \text{"a"} \\ \text{"b"} \\ \text{"Коэф-т корр."} \end{pmatrix}$$

$$\text{Meanings} := \begin{pmatrix} \text{zakon1} & \text{zakon2} & \text{zakon3} & \text{zakon4} \\ \lambda e & \alpha & \mu & l\mu \\ \text{tcp} & \beta & \sigma & l\sigma \\ \text{Cor1} & \text{Cor2} & \text{Cor3} & \text{Cor4} \end{pmatrix}$$

$$\text{Matrix2} := \text{stack}(\text{Names}^T, \text{Meanings}^T)$$

Результирующая матрица

(параметры моделей надежности и коэффициенты корреляции):

$$\text{Matrix2} = \begin{bmatrix} \dots \end{bmatrix}$$

8. Границы доверительных интервалов

Среднее время наработки до отказа:

$$\text{Tcp}_1 := \text{TE}$$

$$\text{Tcp}_2 := \text{TV}$$

$$\text{Tcp}_3 := \text{TN}$$

$$\text{Tcp}_4 := \text{TL}$$

$$\text{Kvar}_1 := \text{VE}$$

$$\text{Kvar}_2 := \text{Vv}$$

$$\text{Kvar}_3 := \text{VN}$$

$$\text{Kvar}_4 := \text{VL}$$

Двусторонняя доверительная вероятность:

$$\theta := 0.9$$

Односторонняя вероятность:

$$\phi := \frac{1 - \theta}{2}$$

$$\phi = \begin{bmatrix} \dots \end{bmatrix}$$

Коэффициент Стьюдента:

$$sT := qt\left[\begin{pmatrix} \phi \\ 1 - \phi \end{pmatrix}, v1 - 1\right]$$

$$sT = \begin{bmatrix} \cdot \\ \cdot \end{bmatrix}$$

$$Int_left_i := T_{cp_i} \cdot \left(1 + sT_1 \cdot \frac{Kvar_i}{\sqrt{v1}}\right)$$

$$Int_left := stack("Нижняя граница", Int_left)$$

$$Int_right_i := T_{cp_i} \cdot \left(1 + sT_2 \cdot \frac{Kvar_i}{\sqrt{v1}}\right)$$

$$Int_right := stack("Верхняя граница", Int_right)$$

$$Int := stack\left(\left(stack("Закон", zakon)\right)^T, Int_left^T, \left(stack("Тсред", T_{cp})\right)^T, Int_right^T\right)$$

Результирующая матрица

(среднее время наработки до отказа и границы доверительных интервалов):

$$Int = \begin{bmatrix} \cdot \\ \cdot \end{bmatrix}$$

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2014618241

Оценка эксплуатационной надежности технических устройств по цензурированным данным

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (RU)*

Авторы: *Шпет Наталья Анатольевна (RU),
Муравлев Олег Павлович (RU)*



Заявка № 2014616134

Дата поступления 26 июня 2014 г.

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ 13 августа 2014 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

ООО "НПО Сибэлектромотор"

Романенко Н.М.

02 2015 г.



АКТ

внедрения результатов диссертационной работы Шпет Н.А.

В производственном процессе ООО "НПО Сибэлектромотор" представляют интерес следующие результаты диссертационной работы Шпет Натальи Анатольевны на тему "Прогнозирование эксплуатационной надежности асинхронных двигателей для лифтов" по специальности 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук:

1. Система оценки количественных показателей надежности асинхронных двигателей, установленных в лебедках пассажирских лифтов, основанная на данных полученных в реальных условиях эксплуатации. Представленные результаты дают возможность для корректировки показателей надежности, установленных в технических условиях, а также совершенствования технологии изготовления лифтовых двигателей.

2. Программа "Оценка эксплуатационной надежности технических устройств по цензурированным данным", защищенная свидетельством об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2014618241. С помощью программы возможно установление вида закона распределения и определение параметров этого закона на основе наработок выборки, состоящей из отказавших и неотказавших двигателей, что позволяет оперативно оценить их надежность.

Полученные результаты ООО "НПО Сибэлектромотор" будет использовать при модернизации асинхронных двигателей для лифтов и разработке рекомендаций для заказчиков по совершенствованию системы технического обслуживания и ремонта.

Главный конструктор
ООО "НПО Сибэлектромотор"

Плотников Ю.А.



УТВЕРЖДАЮ

Директор

ООО "Томская лифтовая компания"

Шалагин В.Г.

" 21 " мая 2015 г.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы Шпет Н.А.

Результаты диссертационной работы Шпет Натальи Анатольевны на тему "Прогнозирование эксплуатационной надежности асинхронных двигателей для лифтов" представляют интерес для ООО "Томская лифтовая компания". В частности:

1. Благодаря спрогнозированной автором эксплуатационной надежности статорных обмоток двухскоростных лифтовых асинхронных двигателей с высотой оси вращения 160 мм, скоростью 1500/375 об/мин и 1000/333 об/мин, мощностью 3,55/0,88 кВт и 3,0/1,0 кВт появилась возможность определения начала периода интенсивного старения их изоляции и установления срока капитального ремонта.

2. Для оценки надежности лифтовых двигателей в определенный период и прогнозирования их технического состояния на протяжении дальнейшей эксплуатации предназначена программа для ЭВМ "Оценка эксплуатационной надежности технических устройств по цензурированным данным", что позволяет скорректировать сроки текущего обслуживания и ремонта и соответственно повысить общую надежность пассажирских лифтов.

3. Предложенный автором, алгоритм проведения технического обслуживания и ремонта асинхронных двигателей для лифтов позволяет снизить количество отказов путем обнаружения дефектов узлов на ранней стадии их развития.

4. На основании предложенных рекомендаций, которые обоснованы вероятностными характеристиками, могут быть уточнены межремонтные периоды лифтовых двигателей, что дает возможность для снижения расходов, необходимых для поддержания и восстановления их работоспособного состояния.

Перечисленные результаты будут использованы в ООО "Томская лифтовая компания".

Начальник монтажного участка

ООО "Томская лифтовая компания"

Семиренко Б.Н.